

PREVISÃO E ALERTA DE CHEIAS EM BACIAS REGULARIZADAS

Aplicação ao caso de uma bacia portuguesa

JULIANA MARINA MOREIRA MENDES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**DOUTORA EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS E
AMBIENTE**

Orientador: Professor Doutor Rodrigo Jorge de Oliveira Maia

JANEIRO DE 2017

Este documento corresponde à versão final da tese de doutoramento, a qual, tendo originalmente sido submetida para avaliação em Janeiro de 2016, foi revista de acordo com as recomendações do júri durante as provas públicas de defesa da tese, as quais decorreram a 25 de Janeiro de 2017.

A realização deste trabalho foi financiada durante quatro anos (2010-2014) pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através da bolsa de doutoramento com a referência SFRH/BD/65905/2009, suportada pelo Programa Operacional Potencial Humano do Fundo Social Europeu (POPH/FSE).



Aos meu país

À minha avó

Ao meu irmão

Ao Pedro

“Eu pedi forças, e Deus deu-me dificuldades para me fazer forte.
Eu pedi sabedoria, e Deus deu-me problemas para resolver.
Eu pedi amor, e Deus deu-me pessoas com problemas para ajudar.
Eu pedi favores, e Deus deu-me oportunidades.
Eu não recebi nada do que pedi, mas tive tudo o que precisava.”

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Rodrigo Maia, agradeço o desafio e o incentivo à realização deste trabalho e todas as condições que me proporcionou para o seu desenvolvimento e conclusão. Agradeço também a sua amizade e a confiança que sempre demonstrou nas minhas capacidades. A ele, com quem trabalho há mais de 8 anos, devo muito do que hoje sei e do que hoje sou, a nível profissional. Por tudo isso, estou-lhe muito grata!

Agradeço também à Fundação para a Ciência e Tecnologia, o financiamento concedido durante quatro anos (2010 a 20104) para a realização do doutoramento.

À EDP, ao ECMWF e à APA (em especial ao SNIRH) agradeço a disponibilização dos dados utilizados no estudo.

Aos que durante estes últimos anos partilharam comigo o dia-a-dia de forma mais próxima – Raquel Silva, Isabel Iglesias, Manuela Oliveira, Cristina Silva, Cristina Vilarinho, António Pinto, António Lobo, Marco Amorim, Eduardo Vivas, Pedro Leite e Paulo Santos – e a todos os meus outros colegas, agradeço o apoio, o companheirismo e a alegria que sempre estiveram presentes no nosso ambiente de trabalho.

Agradeço também, de forma especial, ao Ricardo Alves e ao Frederico Pinho pelo apoio informático, que foi essencial para a aquisição e o processamento dos dados de previsão em tempo útil.

Para todos os professores que ao longo dos meus muitos anos de estudo contribuíram para a minha educação e para a minha formação em engenharia, expresso aqui também a minha gratidão.

Aos meus pais agradeço o seu amor incondicional, a educação que me deram e todas as condições que proporcionaram para eu poder chegar até aqui. Agradeço-lhes também, bem com à minha família e aos meus amigos mais próximos, a amizade, a paciência, a força e o ânimo que me deram durante este percurso. À minha avó Armanda, que sempre foi o meu grande exemplo, agradeço-lhe, de forma muito especial, a sua bênção, por ter estado sempre e por ainda estar aqui agora a viver comigo este momento.

Ao Pedro, agradeço a sua compreensão e o seu companheirismo nestes últimos anos, e a ajuda que me tem dado no trabalho, especialmente nas revisões dos textos dos artigos como da própria tese. Além disso, e o mais importante, agradeço-lhe por alegrar os meus dias com a sua presença.

A todos que, direta ou indiretamente, estiveram envolvidos neste trabalho, o meu muito obrigada!

RESUMO

Nas últimas décadas, a consciencialização para a problemática das cheias na opinião pública e a sua importância na agenda política têm conduzido a um aumento considerável da investigação nestes domínios. Tal, a par com os progressos na previsão meteorológica e hidrológica, tem vindo a criar uma base de conhecimento importante para suporte na elaboração de estratégias de gestão sustentáveis dos cursos de água e de resposta às cheias, nomeadamente através da gestão mais eficiente das albufeiras. O conhecimento sobre a previsão de cheias constitui uma peça essencial na preparação para esses eventos, permitindo fornecer alertas antecipados sobre a magnitude e a variação temporal das afluências, o que possibilita às autoridades competentes a tomada de medidas proactivas de proteção e mitigação dos impactos expectáveis. Várias instituições internacionais têm trabalhado no desenvolvimento de sistemas operacionais de monitorização, previsão e alerta de cheias, baseados em modelos integrados, que englobam componentes de previsão meteorológica e hidrológica. Os desafios continuam a ser o de melhorar a fiabilidade dos sistemas e o de aumentar o período de previsão. Para este fim, e atendendo à incerteza dos processos subjacentes à previsão de cheias, tem-se tornado frequente o recurso a uma abordagem probabilística, utilizando-se Sistemas de Previsão por *Ensemble* (SPE). A nível nacional, este tipo de abordagem ainda não está ser implementado; a previsão de cheias continua a ser realizada apenas a curto prazo, baseando-se sobretudo na monitorização em tempo-real de variáveis hidrometeorológicas em vários pontos das bacias hidrográficas e na utilização de modelação hidrológica em situações de alerta iniciadas pelos dados monitorizados.

O objetivo central da presente dissertação consiste, assim, no desenvolvimento e aplicação de uma metodologia de previsão e alerta de cheias para bacias regularizadas, que possa ser utilizada de forma contínua no tempo e que permita prever a ocorrência de cheias com precisão e antecedência suficientes para que, em tempo oportuno, se possam tomar as medidas de exploração das albufeiras adequadas ao amortecimento dos efeitos desses eventos, através da gestão mais eficaz dos volumes armazenados.

Para tal, foi desenvolvida, e aplicada à bacia do rio Mondego, uma metodologia de previsão de cheias essencialmente baseada: i) em previsões de precipitação por *ensemble* obtidas por modelos de circulação global, com um alcance temporal de 10 dias e uma discretização de 3 horas, produzidas e disponibilizadas pelo ECMWF; e ii) na utilização de um modelo hidrológico semi-distribuído, que é calibrado automaticamente e de forma contínua em função da variação do estado hidrológico da bacia ao longo do tempo, e que é aplicado numa base diária, a cada um dos membros do conjunto de previsões de precipitação. Desta forma, obtém-se previsões de afluências por *ensemble* – com alcance de 10 dias e um passo temporal de 3 horas, para cada uma das unidades de análise espacial (sub-bacias) definidas no modelo – que são avaliadas em termos da qualidade e consistência. Seguidamente, foi desenvolvido um modelo de gestão operacional de albufeiras para situações de cheia, baseado nas previsões das afluências realizadas e nas características dos aproveitamentos hidráulicos existentes na bacia com capacidade de amortecimento de cheias. Este modelo permite otimizar o valor do caudal a descarregar diariamente por cada uma das albufeiras do sistema de modo a: i) evitar ou minimizar as cheias fluviais a jusante; e ii) manter os níveis de água nas albufeiras o mais elevados possível, sem comprometer as condições de segurança das correspondentes estruturas (barragem e órgãos de descarga).

Palavras-chave: Cheias, previsão por *ensemble*, simulação hidrológica, gestão de albufeiras.

ABSTRACT

Over the last few decades, public awareness towards flooding phenomena, as well as their importance in the political agenda, have increased considerably. A growing body of research in this domain, along with progress in hydrologic and weather forecasting, has supported advances in the knowledge of sustainable stream management and flood response mechanisms, namely through more efficient reservoir management.

Flood forecasting plays a key part in the preparation for such events, by supplying early alerts on the magnitude and time variation of streamflow, enabling authorities to undertake proactive measures to protect citizens and assets and mitigate expected impacts. Several research institutions worldwide have worked on the development of operational flood monitoring, forecasting and alert systems, based on integrated models which encompass hydrological and meteorological forecasting components. The main challenges continue to be the improvement of system reliability and the extension of the forecasting lead time. In view of the uncertainty underlying flood forecasting, the use of a probabilistic approach has become the rule, through the use of *Ensemble* Forecasting Systems. In Portugal, this type of approach has not yet been implemented; flood forecasting continues to be undertaken merely over the short term, namely based on real-time monitoring of hydrometeorological variables, measured in different points along the river basins, and on the use of hydrological modelling in alert situations as indicated by the monitored data.

The main goal of the present dissertation is therefore the development and application of a forecasting and alert methodology for regularized basins, which can be continuously used over time and which allows the timely and accurate prediction of flood occurrence, so that, in due time, adequate reservoir management measures can be taken to dampen the impacts from such events, through more efficient management of stored volumes.

A flood forecasting methodology was thus developed and applied to the Mondego river basin, essentially based on: i) *ensemble* precipitation forecasts obtained from global circulation models, with a lead time of 10 days and a 3 hour time step, produced and disclosed by ECMWF; and ii) the use of a semi-distributed hydrologic model, which is automatically calibrated, in a continuous manner, as a function of the variation in the hydrological state of the basin through time, and applied on a daily basis, for each of the members of the precipitation forecasts. Thus, an *ensemble* forecast– with a 10 day horizon and a timeframe of 3 hours - for each of the spatial units (sub-basins) defined in the model is obtained and evaluated in terms of its quality and consistency. Subsequently, an operation management model for reservoirs in flooding situations was developed, based on runoff predictions and on the characteristics of the hydraulic structures existing in the basin with a flood cushioning capacity. This model enables the optimization of the flow amount to be discharged daily by each of the reservoirs in the system in order to: 1) avoid or minimize river flooding downstream; and ii) maintain the reservoir water levels as high as possible, without compromising the safety conditions in their structures (dam and discharge elements).

Key Words: Floods, *ensemble* forecast, hydrological simulation, reservoir management.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE DE CAPÍTULOS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE QUADROS	xix
LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS	xxi
LISTA DE PROGRAMAS UTILIZADOS	xxiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DO CONHECIMENTO	7
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.2. PREVISÃO METEOROLÓGICA.....	9
2.2.1. NOÇÕES DE BASE	9
2.2.2. MODELOS NUMÉRICOS DE PREVISÃO DO ESTADO DO TEMPO.....	9
2.2.3. PREVISÕES POR <i>ENSEMBLE</i>	11
2.2.4. <i>DOWNSCALING</i>	13
2.2.5. PREVISÃO DO ESTADO DO TEMPO EM PORTUGAL	14
2.3. PREVISÃO HIDROLÓGICA	16
2.3.1. INTRODUÇÃO	16
2.3.2. PROCESSOS HIDROLÓGICOS ENVOLVIDOS NA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA	17
2.3.3. CONCEITO DE MODELO HIDROLÓGICO	18
2.3.4. MODELOS MATEMÁTICOS DE PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO.....	19
2.3.5. PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA.....	22
2.3.6. CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS	28
2.3.7. UTILIZAÇÃO DE PREVISÕES DE PRECIPITAÇÃO POR <i>ENSEMBLE</i> NA PREVISÃO DE CHEIAS	31
2.4. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DE PREVISÕES	33
2.4.1. INTRODUÇÃO	33
2.4.2. VERIFICAÇÃO DE PREVISÕES	34
2.5. GESTÃO OPERACIONAL DE ALBUFEIRAS.....	36

2.6. SISTEMAS DE ALERTA DE CHEIAS.....	38
2.6.1. EXPERIÊNCIA A NÍVEL INTERNACIONAL EM SISTEMAS DE PREVISÃO E ALERTA DE CHEIAS.....	38
2.6.2. EXPERIÊNCIA NACIONAL: SISTEMA DE VIGILÂNCIA E ALERTA DE RECURSOS HÍDRICOS (SVARH)	44
2.7. SÍNTESE E COMENTÁRIOS GERAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	48
3. METODOLOGIA.....	51
3.1. INTRODUÇÃO	51
3.2. PREPARAÇÃO, CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO HIDROLÓGICA.....	52
3.2.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO HIDROLÓGICA	52
3.2.2 CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO HIDROLÓGICA.....	56
3.3. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS DE PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO.....	60
3.3.1 DADOS UTILIZADOS	60
3.3.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS PARA ENTRADA NO MODELO DE PREVISÃO HIDROLÓGICA	61
3.4. SIMULAÇÃO E PREVISÃO HIDROLÓGICA	62
3.5. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DAS PREVISÕES HIDROLÓGICAS.....	65
3.5.1 AVALIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA	65
3.5.2 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE	67
3.6. OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO OPERACIONAL DE ALBUFEIRAS EM SITUAÇÕES DE RISCO DE CHEIA.....	69
3.6.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO DE GESTÃO OPERACIONAL DE ALBUFEIRAS	69
3.6.2. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO	71
4. CASO DE ESTUDO.....	73
4.1. INTRODUÇÃO	73
4.2. SELEÇÃO DO CASO DE ESTUDO	73
4.3. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MONDEGO	75
4.3.1. CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA.....	75
4.3.2. CONTEXTO ADMINISTRATIVO	77
4.3.3. OCUPAÇÃO DO SOLO	77
4.3.4. GEOLOGIA	78
4.3.5. CLIMA.....	78
4.3.6. HIDROLOGIA	80
4.3.7. APROVEITAMENTOS HIDRÁULICOS	80
4.4. SISTEMA REGULADO AGUIEIRA-RAIVA-FRONHAS	87
4.4.1. CARACTERÍSTICAS DAS ALBUFEIRAS E DOS SEUS ÓRGÃOS DE DESCARGA.....	87
4.4.2. REGRAS DE EXPLORAÇÃO.....	92
4.5. CARACTERIZAÇÃO DAS CHEIAS NO RIO MONDEGO.....	96
4.5.1. ZONAS INUNDÁVEIS	96

4.5.2. REGISTOS DE CHEIAS OCORRIDAS.....	97
4.5.3. ESTIMATIVAS DOS CAUDAIS DE CHEIA EM REGIME NATURAL	101
4.6. DADOS DISPONÍVEIS	105
5. MODELAÇÃO E PREVISÃO HIDROLÓGICA.....	109
5.1. INTRODUÇÃO	109
5.2. PREPARAÇÃO, CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO HIDROLÓGICA.....	109
5.2.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO	109
5.2.2. CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO PARA PREVISÃO CONTÍNUA DE CAUDAIS	121
5.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS DE PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO	131
5.4. SIMULAÇÃO E PREVISÃO HIDROLÓGICA	132
5.5. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DAS PREVISÕES HIDROLÓGICAS	133
5.5.1. ANÁLISE GRÁFICA	134
5.5.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CONSISTÊNCIA	137
5.5.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA QUALIDADE	139
5.5.4. SELEÇÃO DA PREVISÃO DE REFERÊNCIA PARA A TOMADA DE DECISÕES.....	148
5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	149
6. OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO OPERACIONAL DE ALBUFEIRAS EM SITUAÇÕES DE CHEIA	151
6.1. INTRODUÇÃO	151
6.2. MODELO DE GESTÃO OPERACIONAL	151
6.2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	151
6.2.2. DADOS DE ENTRADA.....	152
6.2.3. FLUXOGRAMA	154
6.2.4. FORMULAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	156
6.2.5. PROCEDIMENTOS DE EXPLORAÇÃO A ADOTAR EM FUNÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO	160
6.2.6. EXEMPLIFICAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	162
6.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO DE GESTÃO OPERACIONAL DAS ALBUFEIRAS DA AGUIEIRA E DE FRONHAS EM SITUAÇÕES DE CHEIA	164
6.3.1. PERÍODOS SIMULADOS E TIPOS DE AVALIAÇÃO.....	164
6.3.2. DADOS DE BASE.....	165
6.3.3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	166
6.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	188
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA O FUTURO	189
BIBLIOGRAFIA	193
ANEXOS.....	211

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes gerais de um sistema de alerta de cheias (adaptado de UNISDR (2002) e Garrett (2011)).	7
Figura 2. Representação do processo de realização de uma previsão por <i>ensemble</i> a partir de diversas condições iniciais (Fan, 2015)	12
Figura 3. Estrutura constituinte das redes de observação do IPMA (IPMA, 2015).	15
Figura 4. Processos envolvidos na geração do escoamento superficial através da precipitação (adaptado de Feldman, 2000).	17
Figura 5. Resumo dos casos de aplicação estudados no âmbito do desenvolvimento da ferramenta de apoio à decisão para seleção de um programa de simulação para previsão de cheias, realizada no âmbito da <i>WMO Flood Forecasting Initiative</i> (adaptado de WMO, 2013).	24
Figura 6. Representação esquemática do processo de modelação hidrológica espacialmente distribuída utilizado pelo DIWA (adaptado de Szabó, 2007).	25
Figura 7. Representação genérica dos processos hidrológicos considerados pelo LISFLOOD (adaptado de Van Der Knijff <i>et al.</i> , 2010 e EFAS, 2015).	28
Figura 8. Características de avaliação das previsões.	33
Figura 9. Representação esquemática do funcionamento geral do EFAS (adaptado de EFAS, 2015).	39
Figura 10. Esquema geral de definição dos níveis de alerta do EFAS (adaptado de EFAS, 2015).	40
Figura 12. Esquema ilustrativo da modelação hidrológica de uma bacia hidrográfica efetuada no âmbito do SVARH (SNIRH, 2004).	47
Figura 13. Fluxograma da metodologia geral adotada nesta tese.	51
Figura 14. Esquema geral do procedimento utilizado para construção do modelo de previsão hidrológica no HEC-HMS (dados de base, aplicações informáticas auxiliares para o processamento dos dados de base, componentes e resultados do modelo).	54
Figura 15. Esquema geral do procedimento utilizado para calibração das simulações realizadas para cada dia do período de calibração selecionado e para cada secção de controlo definida.	58
Figura 16. Exemplificação do método de interpolação utilizado para converter os dados de previsão de precipitação em grelha, para cada uma das sub-bacias do modelo hidrológico.	61
Figura 17. Esquema exemplificativo do processo de transformação de uma previsão por <i>ensemble</i> em múltiplas previsões determinísticas correspondentes aos percentis 25, 50, 75 e 90, à média e ao máximo da distribuição do conjunto de membros em cada período de previsão: a) previsão de caudal por <i>ensemble</i> composta por 52 membros, para um alcance temporal de 240h; b) distribuição dos membros da previsão por <i>ensemble</i> para um dado período de previsão; c) conjunto de previsões determinísticas obtidas através do cálculo das medidas de posição indicadas para cada um dos períodos de previsão (0-240h).	64
Figura 18. Esquema exemplificativo do processo de avaliação da consistência de previsões sucessivas: exemplo de previsões determinísticas realizadas em 6 dias consecutivos.	67
Figura 19. Características do modelo de gestão operacional de albufeiras.	69
Figura 20. Esquema ilustrativo do processo de limitação do caudal máximo afluente (Q_{max}) a uma secção a jusante do sistema de albufeiras, tendo em conta as aflúências futuras previstas.	71

Figura 21. Localização relativa da bacia hidrográfica do rio Mondego (à esquerda), e do rio Mondego e dos seus principais afluentes (à direita).	75
Figura 22. Carta hipsométrica da região da bacia hidrográfica do rio Mondego (adaptado de IGP, 2012).	77
Figura 23. Precipitação média mensal ponderada na bacia do rio Mondego, em ano médio (ARH-Centro, 2011a).	79
Figura 24. Escoamento médio mensal na foz bacia do rio Mondego, em ano médio (ARH-Centro, 2011a).	80
Figura 25. Esquema do Sistema do Médio e Baixo Mondego, constituído pelas albufeiras das barragens de Fronhas, Aguieira, Raiva e pelo Açude de Coimbra.	81
Figura 26. Localização das barragens existentes na bacia do rio Mondego, cujas albufeiras têm capacidade de armazenamento superior a 1 hm ³ (adaptado de SNIRH, 2012a).	85
Figura 27. Curva de capacidades da albufeira da Aguieira (EDP, 2007).	87
Figura 28. Curva de vazão de cada um dos descarregadores de cheias da barragem da Aguieira (EDP, 2007).	88
Figura 29. Curva de capacidades da albufeira da Raiva (EDP, 2007).	89
Figura 30. Curva de vazão do descarregador de cheias da barragem da Raiva (EDP, 2007).	90
Figura 31. Curva de capacidades da albufeira de Fronhas (EDP, 2007).	91
Figura 32. Curvas de vazão dos descarregadores de cheias da barragem de Fronhas (EDP, 2007).	91
Figura 33. Caudais instantâneos máximos registados na Ponte de Santa Clara em Coimbra nos anos representados, entre 1917 e 1984 (Marques e Pina, 2013).	98
Figura 34. Fotografias das inundações em Coimbra (em cima) e no vale do Baixo Mondego, na cheia de 26 e 27 de janeiro 2001 (SNIRH, 2014).	99
Figura 35. Fotografia das inundações em Coimbra na cheia de 30 de janeiro 2009 (Marques e Pina, 2013).	100
Figura 36. Fotografias das inundações em Coimbra na cheia de 19 de janeiro de 2013: à esquerda, uma esplanada inundada no Parque Mondego e à direita, a ponte pedonal da Praia Fluvial de Torres do Mondego arrastada pela corrente do rio (Um Pingo de Luz, 2013a e 2013b).	100
Figura 37. Fotografias das inundações ocorridas na zona ribeirinha da cidade de Coimbra (Parque Mondego) na cheia de 30 de março de 2013 (Um Pingo de Luz, 2013c).	100
Figura 38. Fotografias das inundações ocorridas na zona ribeirinha da cidade de Coimbra (Parque Mondego) na cheia de 3 de janeiro de 2014 (Público, 2014).	101
Figura 39. Fotografias das inundações ocorridas na zona ribeirinha da cidade de Coimbra (Parque Mondego) na cheia de 10 de fevereiro de 2014 (Coimbra Canal, 2014).	101
Figura 40. Fotografias das inundações ocorridas na zona ribeirinha da cidade de Coimbra (Parque Mondego à esquerda e Mosteiro de Santa Clara à direita) na cheia de 11 de janeiro de 2016 (Coimbra Canal, 2014).	101
Figura 41. Estimativas dos caudais de cheia afluentes a Coimbra (secção da Ponte de Santa Clara) em regime natural, para vários períodos de retorno, obtidos em vários estudos.	103
Figura 42. Estimativas dos caudais de cheia afluentes à barragem da Aguieira para vários períodos de retorno, obtidos em vários estudos.	104

Figura 43. Estimativas dos caudais de cheia no rio Alva (secção da Ponte Mucela - próxima da barragem de Fronhas) para vários períodos de retorno, obtidos em três estudos diferentes.....	104
Figura 44. Estimativas dos caudais de cheia no rio Ceira (secção da Ponte Cabouco) para vários períodos de retorno, obtidos em dois estudos diferentes.	104
Figura 45. Localização das estações meteorológicas da rede de monitorização do SNIRH, na região da bacia hidrográfica do rio Mondego (SNIRH, 2012a).	105
Figura 46. Localização das estações hidrométricas da rede de monitorização do SNIRH, na região da bacia hidrográfica do rio Mondego (SNIRJ, 2012a).	105
Figura 47. Localização das estações meteorológicas da rede de monitorização do IPMA, na região da bacia hidrográfica do rio Mondego.	107
Figura 48. Variação espacial o CN (para condições do tipo AMCII) na bacia hidrográfica do rio Mondego (resolução de 500x500 m) (SNIRH, 2012a).	108
Figura 49. Representação do MDT da bacia hidrográfica do rio Mondego, com uma resolução de 25x25 m.	108
Figura 50. Representação esquemática do modelo de bacia construído.	111
Figura 51. Hidrogramas gerados na sub-bacia SB2, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo às alterações dos parâmetros: i) percentagem de área impermeável (AI) e ii) retenção inicial (RI). Os restantes parâmetros do modelo mantiveram-se constantes, com os valores indicados no Quadro 18. Nas quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001, que corresponde a uma das maiores cheias registadas na bacia do Mondego (ver 4.5.2).	113
Figura 52. Hidrogramas gerados na sub-bacia SB2, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo a alterações do tempo de resposta da bacia (Tlag). Os restantes parâmetros do modelo mantiveram-se constantes, com os valores indicados no Quadro 18. Nas quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001.	114
Figura 53. Hidrogramas gerados na sub-bacia SB2, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo a alterações do parâmetro CN. Os restantes parâmetros do modelo mantiveram-se constantes, com os valores indicados no Quadro 18. Nas quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001.	115
Figura 54. Hidrogramas gerados na sub-bacia SB1, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo a alterações do parâmetro Rp. Os restantes parâmetros do modelo mantiveram-se constantes, com os valores indicados na legenda. Nas quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001.	116
Figura 55. Hidrogramas gerados na sub-bacia SB1, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo a alterações do parâmetro R. Os restantes parâmetros do modelo mantiveram-se constantes, com os valores indicados na legenda. Nas quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001.	117
Figura 56. Hidrogramas efluentes do troço fluvial localizado mais a jusante dentro da bacia SB2, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo a alterações do parâmetro n (Coeficiente de Manning), mantendo os restantes parâmetros do modelo constantes. Nas	

quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001.	119
Figura 57. Hidrogramas efluentes do troço fluvial localizado mais a jusante dentro da bacia SB2, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo a alterações do parâmetro L (largura da secção transversal), mantendo os restantes parâmetros do modelo constantes. Nas quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001.	120
Figura 58. Áreas consideradas para efeito da distribuição da precipitação no modelo hidrológico (unidades de precipitação).	121
Figura 59. Representação das 4 estações pluviométricas e respetivos polígonos de Thiessen, considerados na avaliação dos dados de precipitação utilizados na calibração e verificação do modelo hidrológico.	122
Figura 60. Resultados do processo de calibração na secção da Aguieira: a) parâmetros de calibração ajustados (CN e R); b) variáveis hidrometeorológicas (RV_{-5} , TP_{+3} e TP_{-60}) estabelecidas para refletir o estado de humidade do solo; e c) indicadores de desempenho obtidos (PBIAS e NS). Os valores correspondentes são apresentados no Quadro A3.1 do Anexo 3.	124
Figura 61. Resultados do processo de calibração na secção de Fronhas: a) parâmetros de calibração ajustados (CN e R); b) variáveis hidrometeorológicas (RV_{-5} , TP_{+3} e TP_{-60}) estabelecidas para refletir o estado de humidade do solo; e c) indicadores de desempenho obtidos (PBIAS e NS).	125
Figura 62. Comparação, na secção da Aguieira, dos valores do caudal observado (Obs.), com os resultados das simulações (Mod.) realizadas com distintos valores dos parâmetros de calibração CN e R, dentro do período de 10 dias iniciado às 00:00h do dia indicado no eixo das abcissas.	126
Figura 63. Comparação, na secção da Aguieira, dos valores do caudal observado (Obs.) com os resultados das simulações (Mod.) realizadas com os parâmetros de calibração CN e R definidos pelos critérios apresentados no Quadro 20, dentro do período de 10 dias iniciado às 00:00h dos dias indicados no eixo das abcissas.	129
Figura 64. Comparação, na secção de Fronhas, dos valores do caudal observado (Obs.) com os resultados das simulações (Mod.) realizadas com os parâmetros de calibração CN e R definidos pelos critérios apresentados no Quadro 21, dentro do período de 10 dias iniciado às 00:00h dos dias indicados no eixo das abcissas.	130
Figura 65. Representação das células que intercetam a bacia do rio Mondego, correspondentes a ambos os tipos de dados de precipitação utilizados: i) à esquerda: grelha dos dados de previsão do ENS com 0,25 graus decimais de resolução espacial e, ii) à direita: grelha dos dados do HRES, com 0,125 graus decimais de resolução espacial.	132
Figura 66. Comparação das previsões de caudais por <i>ensemble</i> realizadas nos 6 dias anteriores à cheia ocorrida a 30 de março de 2013, com os correspondentes caudais observados: i) na secção da Aguieira, representada à direita, e ii) na secção de Fronhas, à esquerda.	135
Figura 67. Comparação das previsões de caudais por <i>ensemble</i> realizadas nos 6 dias anteriores à cheia ocorrida a 10 de fevereiro de 2014, com os correspondentes caudais observados: i) na secção da Aguieira, representada à direita, e ii) na secção de Fronhas, à esquerda.	136
Figura 68. Valores médios (a azul) e máximos (a vermelho) dos desvios padrão obtidos para cada período de previsão, para: a secção da Aguieira – à esquerda; e a secção de Fronhas – à direita. .	137

Figura 69. Desvio-padrão médio das previsões, realizadas num determinado dia t , em relação às previsões efetuadas nos 3 dias anteriores (considerando os valores médios dos conjuntos): $P(t)-P(t-x)$, com t a variar de 1 a 3. Análise para as secções da Aguieira (AG) e de Fronhas (FR).....	138
Figura 70. Desvio-padrão médio das previsões, realizadas num determinado dia t , em relação às previsões efetuadas nos 3 dias anteriores (considerando os valores máximos dos conjuntos): $P(t)-P(t-x)$, com t a variar de 1 a 3. Análise para as secções da Aguieira (AG) e de Fronhas (FR).....	138
Figura 71. Resultados do MAE da média do conjunto das previsões de caudais por <i>ensemble</i> , para cada período de previsão, para: a) a secção da Aguieira – gráfico superior e b) e a secção de Fronhas – gráfico inferior.	140
Figura 72. Resultados do RME da média do conjunto das previsões de caudais por <i>ensemble</i> , para cada período de previsão, para: a) a secção da Aguieira – gráfico superior e b) e a secção de Fronhas – gráfico inferior.	141
Figura 73. Resultados do MCRPS das previsões de caudais por <i>ensemble</i> , para cada período de previsão, para: a) a secção da Aguieira – gráfico superior e b) e para a secção de Fronhas – gráfico inferior.....	142
Figura 74. Resultados do BS das previsões de caudais por <i>ensemble</i> , para cada limiar definido na legenda e para cada período de previsão, para: a) a secção da Aguieira – gráfico superior e b) e a secção de Fronhas – gráfico inferior.	143
Figura 75. Resultados do <i>Rank Histogram</i> das previsões de caudais por <i>ensemble</i> na secção da Aguieira, para os períodos de previsão de 24h, 72h, 120h e 240h.	144
Figura 76. Resultados do <i>Rank Histogram</i> das previsões de caudais por <i>ensemble</i> na secção de Fronhas, para os períodos de previsão de 24h, 72h, 120h e 240h.	145
Figura 77. Resultados do ROCD das previsões de caudais por <i>ensemble</i> na secção da Aguieira, para cada limiar definido na legenda e para cada um dos períodos de previsão de 24h, 72h, 120h e 240h.	146
Figura 78. Resultados do ROCD das previsões de caudais por <i>ensemble</i> na secção de Fronhas, para cada limiar definido na legenda e para cada um dos períodos de previsão de 24h, 72h, 120h e 240h.	147
Figura 79. Previsões do caudal afluente em regime natural às secções da Aguieira e de Fronhas e do correspondente caudal afluente à secção de Coimbra decorrente das sub-bacias não regularizadas a jusante daquelas, iniciadas às 00:00h do dia 08-02-2014. As linhas contínuas representam as previsões determinísticas correspondentes aos percentis 25, 50, 75 e 90, à média e ao máximo da previsão por <i>ensemble</i> em cada período de previsão; os pontos pretos indicam os valores considerados como previsões de referência (dados de entrada) do modelo de gestão das albufeiras.	153
Figura 80. Fluxograma do modelo desenvolvido para a gestão operacional conjunta das albufeiras da Aguieira e de Fronhas.	155
Figura 81. Esquema ilustrativo do processo de limitação do caudal máximo afluente a Coimbra (Q_{CO_max}), tendo em conta apenas as afluências previstas para as futuras 240 horas das sub-bacias regularizadas (réplica da Figura 20).	160
Figura 82. Resultados da simulação da gestão das albufeiras da Aguieira e de Fronhas com o modelo desenvolvido, iniciada às 00:00h do dia 08-02-2014, para os 10 dias seguintes (linhas azuis contínuas).....	163

Figura 83. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando as regras de exploração "R2007". Período de simulação: 01 a 28/02/2014.	168
Figura 84. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando as regras de exploração "R2007+". Período de simulação: 01 a 28/02/2014.	169
Figura 85. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando o modelo de gestão de albufeiras desenvolvido. Período de simulação: 01 a 28/02/2014.....	170
Figura 86. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 18 a 29/02/2001, utilizando as regras de exploração "R2007".....	173
Figura 87. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 18 a 29/02/2001, utilizando as regras de exploração "R2007+".....	174
Figura 88. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 18 a 29/02/2001, utilizando o modelo desenvolvido com os caudais afluentes previstos.....	175
Figura 89. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 18 a 29/02/2001, utilizando o modelo desenvolvido com os caudais afluentes reais.	176
Figura 90. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 2 a 13/01/2016, utilizando as regras de exploração "R2007".....	180
Figura 91. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 2 a 13/01/2016, utilizando as regras de exploração "R2007+".....	181
Figura 92. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 2 a 13/01/2016, utilizando o modelo desenvolvido com os caudais afluentes previstos.....	182
Figura 93. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 2 a 13/01/2016, utilizando o modelo desenvolvido com os caudais afluentes reais.	183

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1. Exemplo de modelos de previsão meteorológica e respetivos centros utilizadores.	11
Quadro 2. Características das previsões meteorológicas de curto e médio alcance do sistema operacional do ECMWF (ECMWF, 2015 b e c).	16
Quadro 3. Modelos matemáticos determinísticos utilizados pelo programa HEC-HMS na simulação de processos hidrológicos. Classificação: ME- modelo de eventos; MC - modelo contínuo; E – empírico; C - conceitual; A – agregado; D - distribuído; PM – de parâmetros medidos e PA – de parâmetros ajustados (Feldman, 2000).	21
Quadro 4. Programas com escala temporal sub-diária, analisados por Beckers et al. (2009).	22
Quadro 5. Resumo da análise de seis estudos sobre a utilização de indicadores de desempenho na calibração e verificação de modelos hidrológicos.	30
Quadro 6. Exemplos de sistemas de previsão de cheias, e respetivos de centros de previsão hidrológica, que utilizam previsões meteorológicas por <i>ensemble</i> (SPE) como entrada (Clope e Pappenberger, 2009).	32
Quadro 7. Atributos e métodos estatísticos normalmente aplicados na verificação de previsões hidrometeorológicas determinísticas e/ou probabilísticas (<i>ensemble</i>), focadas (S) ou não (N) na superação de um determinado limiar (adaptado de Demargne e Brown, 2013, com inclusão de métodos propostos por Brown et al., 2010).	35
Quadro 8. Métodos selecionados para simular os principais processos hidrológicos que contribuem para a quantificação e previsão dos caudais de cheia, parâmetros requeridos e critérios de estimação adotados (Mendes e Maia, 2015a e 2015b).	55
Quadro 9. Métodos estatísticos utilizados para a avaliação da qualidade das previsões, por tipo de atributo considerado, com a respetiva classificação em termos de tipo de previsão a que é aplicada: determinística e/ou por <i>ensemble</i> , focadas (S) ou não (N) na excedência de um determinado limiar; e com a descrição do resultado ideal (que caracteriza uma qualidade ótima).	68
Quadro 10. Barragens do Sistema do Médio e Baixo Mondego (INAG, 2001a; EDP, 2004; CNPGB, 2012; SNIRH, 2012b).	82
Quadro 11. Barragens do Sistema Electroprodutor da Serra da Estrela com capacidade de armazenamento superior a 1 hm ³ (INAG, 2001a; CNPGB, 2012; SNIRH, 2012b).	83
Quadro 12. Outras barragens existentes na bacia do rio Mondego com capacidade de armazenamento superior a 1 hm ³ (INAG, 2001a; CNPGB, 2012; SNIRH, 2012b).	84
Quadro 13. Aproveitamentos hidroelétricos existentes na Bacia do Rio Mondego (ARH-Centro, 2011b).	86
Quadro 14. Critérios para a gestão da albufeira da Aguieira definidos em 1988, para o período de 15 de outubro a 15 de abril (“Gestão Adaptativa”) (EDP, 2007) – aplicados com as regras “R2007” (ver 4.4.2.2).	93
Quadro 15. Regras de exploração do sistema Aguieira-Raiva-Fronhas em vigor em 2007 (“R2007”), para o período de 15 de outubro a 15 de abril.	94
Quadro 16. Regras de exploração do sistema Aguieira-Raiva-Fronhas propostas pela EDP em 2007 (“R2007+”), para o período de 15 de outubro a 15 de abril.	95
Quadro 17. Critérios para a gestão da albufeira da Aguieira definidos em 2007, para o período de 15 de outubro a 15 de abril (EDP, 2007) – aplicados com as regras “R2007+”	95

Quadro 18. Caracterização inicial dos parâmetros de simulação de cada sub-bacia.	112
Quadro 19. Valores dos parâmetros de simulação relativos aos troços fluviais, obtidos para cada sub-bacia.	118
Quadro 20. Critérios de ajuste dos parâmetros de calibração, CN e R, na secção da Agueira.	128
Quadro 21. Critérios de ajuste dos parâmetros de calibração, CN e R, na secção de Fronhas.	128
Quadro 22. Eventos de cheia e correspondentes períodos de tempo simulados para avaliação do desempenho do modelo de gestão das albufeiras da Agueira e de Fronhas em situações de cheia.	164
Quadro 23. Indicadores de desempenho obtidos para a exploração das albufeiras da Agueira e de Fronhas, para os vários períodos de cheia considerados, com a aplicação das regras de exploração pré-definidas – “R2007” e “R2007+” – e com a utilização do modelo desenvolvido nesta tese, com os dados previstos (Prev) e com os dados observados (Obs).	186

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

ACCESS	<i>Australian Community Climate and Earth-System Simulator</i>
ACTIF	<i>Archeiving Technological Innovation in Flood Forecasting</i>
AEMET	Agencia Estatal de Meteorologia (Espanha)
AMC	<i>Antecedent Moisture Conditions</i>
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ARH	Administração de Região Hidrográfica
BoM	<i>Bureau of Meteorology (Australian Government)</i>
BRAMS	<i>Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System</i>
CE	<i>Comissão Europeia</i>
CHPS	<i>Community Hydrologic Prediction System</i>
CMA	<i>China Meteorological Administration</i>
CN	<i>Curve Number</i> (Número de escoamento do SCS)
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (Brazil)
DWD	<i>Deutscher Wetterdienst</i> (Centro de meteorologia alemão)
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EFAS	<i>European Flood Alert System</i>
ENS	<i>Ensemble Prediction System</i>
ERCC	<i>European Response and Coordination Centre</i>
EU	<i>European Union</i>
EUA	Estados Unidos da América
EVS	<i>Ensemble Verification System</i>
FEWS	<i>Flood Early Warning System</i>
GFS	<i>Global Forecasting System</i>
GSM	<i>Global Spectral Model</i>
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System</i>
HEFS	<i>Hydrologic Ensemble Forecast Service</i>
HEPPEX	<i>Hydrologic Ensemble Prediction Experiment</i>
HIRLAM	<i>High Resolution Limited Area Model</i>
HRES	<i>High resolution forecast</i>
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
JMA	<i>Japan Meteorological Agency</i>
JRC	<i>Joint Research Centre</i>
MCGA	Modelo de Circulação Geral Atmosférico
MDT	Modelo Digital do Terreno

NCEP	<i>National Center for Environmental Prediction</i>
NDC	Nível de Defesa contra Cheias em Coimbra (NDC)
NDO	Nível de Defesa de Obra (m)
NetCDF	<i>Network Common Data Format</i>
NmE	Nível Mínimo de Exploração (m)
NMC	Nível Máximo de Cheia (m)
NME	Nível Máximo de Exploração (m); o mesmo que NPA
NMR	Nível Máximo Recomendável (m)
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NPA	Nível de Pleno Armazenamento (m)
NWS	<i>National Weather Service</i>
NWSRFS	<i>National Weather Service River Forecast System</i>
PBH	Plano de Bacia Hidrográfica
PGRH4	Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis integradas na Região Hidrográfica 4
PGRI	Plano de Gestão dos Riscos de Inundação
PNT	Previsão Numérica do Tempo
RFC	<i>River Forecast Centers</i>
RV ₋₅	Volume total de escoamento nos 5 dias anteriores (<i>Runoff Volume</i>)
SAIH	<i>Sistema Automático de Información Hidrológica</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SMA	<i>Soil Moisture Accounting</i>
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
SVARH	Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos
TIGGE	<i>THORPEX Interactive Grand Global Ensemble</i>
TP ₊₃	Total de precipitação nos 3 dias seguintes
TP ₋₆₀	Total de precipitação nos 60 dias anteriores
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i> (fuso horário de referência mundial)
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting (Model)</i>

LISTA DE PROGRAMAS UTILIZADOS

Programa	Versão
ArcMap + ArcHydro Tools	10.1
HEC-GeoHMS	10.1
HEC-HMS	3.5
HEC-DSSVue	2.0.1
Matlab	R2013a
Python	3.4.3
EVS (<i>Ensemble Verification System</i>)	5.4

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

As cheias fluviais são fenómenos naturais extremos e temporários, associados a um aumento do caudal nas linhas de água, provocado por um elevado volume de precipitação numa determinada área da bacia hidrográfica – que pode ser ocasionado por chuvadas moderadas de longa duração ou por chuvadas curtas de elevada intensidade – ou por um processo acelerado de degelo. Nestas situações, o escoamento ultrapassa, por vezes significativamente, a área ocupada pelo leito normal do curso de água, em resultado de processos hidrológicos de comportamento não linear, originando a inundação dos terrenos marginais. A definição de cheia aqui apresentada corresponde, assim, ao conceito de inundação fluvial (Mendes e Maia, 2010; Ramos, 2013).

A ocorrência de cheias está geralmente associada à produção de danos físicos e prejuízos materiais e, em muitos casos, à perda de vidas humanas (UNISDR, 2002; Jonkman, 2005). Nos últimos 15 anos (2000-2014), só na Europa, foram afectadas pelas cheias cerca de 6,7 milhões de pessoas, tendo-se registado cerca de 1100 mortes devido a essa causa (CRED, 2015). O conhecimento antecipado deste tipo de fenómeno é, portanto, de todo o interesse para que se possam adotar medidas que minimizem os riscos associados.

Desde o início do século XXI, a consciencialização para a problemática das cheias aumentou nas agendas políticas, sendo acompanhada pelos progressos registados na previsão de ocorrência das mesmas (Cloke e Pappenberger, 2009). Em 2002, as Nações Unidas publicaram um documento com linhas orientadoras (UNISDR, 2002) – direccionadas para instituições nacionais e organizações internacionais com competências na tomada de decisões nesta área – para auxiliar na redução dos impactos decorrentes das cheias. Segundo esse documento, as melhorias na previsão de cheias podem reduzir até cerca de 35% a média anual dos danos totais causados pelos correspondentes eventos. Ao nível da União Europeia, foi aprovada em 2007 a Diretiva 2007/60/CE (CE, 2007) que, em termos globais, pretende mobilizar os Estados-Membros na contribuição para a redução dos riscos e impactos das inundações. Neste âmbito, a diretiva estabelece a necessidade de elaboração de planos de gestão dos riscos de inundações ao nível de cada região hidrográfica, os quais devem prever medidas de prevenção, proteção e preparação para reduzir os efeitos das inundações, e abranger o

desenvolvimento e utilização de sistemas de previsão e alerta precoce de cheias que tenham em conta as características de cada bacia ou sub-bacia hidrográfica (CE, 2007). Em 2010, Portugal transpôs para a legislação nacional esta diretiva, através do Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de outubro, determinando a elaboração e implementação desses planos e instituindo o Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH) – que substitui o anterior Sistema de Vigilância e Alerta de Cheias – como o sistema de previsão e de alerta para salvaguarda de pessoas e bens em situações de cheias (DR, 2010). Porém, este sistema está a funcionar essencialmente para a monitorização em “tempo-real” dos recursos hídricos, não integrando ainda uma componente de previsão operacional de cheias que permita, de forma contínua no tempo, prever a ocorrência de situações de cheia a médio prazo.

Uma previsão fiável da ocorrência, da variação temporal e da magnitude de uma cheia permite uma abordagem proativa para minimizar o seu impacto, por vezes assolador. Os sistemas de previsão de cheias constituem, assim, uma parte essencial da estratégia de preparação para estes eventos, fornecendo alertas antecipados sobre as afluências e sobre as áreas de risco de inundação, possibilitando às autoridades competentes tomar medidas de proteção e mitigação face aos impactos expectáveis, construindo proteções e evacuando as populações ameaçadas, antes que a possível situação ocorra (Cloke e Pappenberger, 2009).

Frequentemente, as cheias não podem ser previstas com o rigor e com a antecedência desejáveis. Contudo, ainda assim, os seus efeitos podem ser atenuados através da aplicação de instrumentos de gestão do território ou da construção de estruturas de proteção e regularização dos cursos de água. Neste sentido, a solução tradicional para controlar as cheias tem sido uma forte intervenção estrutural: construção de barragens, diques e barreiras (Maia e Ribeiro, 1998; CE, 2004). Por exemplo, nas bacias hidrográficas onde existem aproveitamentos hidráulicos de fins múltiplos que incluem a função de controlo de cheias, a medida normalmente aplicada para prevenir e atenuar os efeitos de uma possível ocorrência de cheia a jusante dos aproveitamentos é a redução do nível de pleno armazenamento (NPA) das albufeiras nas situações em que a probabilidade de ocorrência de uma cheia é significativa, isto é: i) durante os meses húmidos – em Portugal, normalmente de outubro a abril –, ii) ou apenas quando o valor do caudal médio afluente a uma determinada secção – normalmente a secção de implantação do aproveitamento – está acima de um determinado limite estipulado. Desta forma, no caso de o evento de cheia vir a ocorrer, há um maior volume de encaixe que permite gerir o caudal efluente até valores limite pré-determinados do caudal afluente ao aproveitamento, possibilitando o amortecimento do caudal de pico da cheia (Ribeiro, 1975). No entanto, as restrições impostas na gestão das albufeiras para proteção de cheias têm impactos na satisfação das demais utilizações. Se nenhum evento de cheia ocorrer, o esvaziamento da albufeira terá sido uma ação desnecessária e inapropriada, na medida em que terá havido desperdício da água armazenada para as outras utilizações, como por exemplo para a rega e para o abastecimento urbano e, no caso de o aproveitamento ter função de produção hidroelétrica, terá havido também uma redução da sua potencial produtividade elétrica, causada pelo abaixamento do nível de água na albufeira.

Por outro lado, tem-se verificado um grande investimento no desenvolvimento de tecnologias de previsão, bem como na melhoria dos processos de tomada de decisão e na integração da avaliação do

risco de inundações nas estratégias de ordenamento local e regional. A investigação neste domínio está a criar uma importante base de informação sobre o comportamento dos sistemas fluviais, que permite aos técnicos e aos decisores políticos obter orientações na elaboração de estratégias de gestão sustentável dos cursos de água e de resposta às cheias (CE, 2004).

No contexto exposto, a presente tese foca-se no desenvolvimento de uma metodologia de previsão e alerta de cheias para bacias regularizadas, onde os aproveitamentos hidráulicos existentes têm um papel importante no controlo das cheias e para os quais a previsão fiável e atempada da ocorrência desses fenómenos pode melhorar o cumprimento dessa função e das restantes utilizações desses aproveitamentos, nomeadamente da produção hidroelétrica.

Como caso de estudo deste trabalho, foi escolhida a bacia hidrográfica do rio Mondego. Esta escolha contou com o parecer favorável das duas entidades com responsabilidade e interesse nestas matérias, a EDP e a APA, as quais foram consultadas com o objetivo de aferir a adequabilidade e as mais-valias da utilização desta bacia face a outras, como caso de estudo para o desenvolvimento e aplicação da metodologia de previsão e alerta de cheias a criar. Os principais motivos que levaram à seleção da bacia do rio Mondego foram: i) a existência de aproveitamentos hidráulicos na bacia com função de regularização de cheias – como é o caso da albufeira da Aguieira – e ii) a frequência de situações de cheia na bacia com consequências a jusante desse aproveitamento, nomeadamente na zona de Coimbra, devido à urbanização da sua zona ribeirinha, e no vale agrícola do Baixo Mondego, atentas as correspondentes obras de regularização do rio realizadas nessa área aluvionar.

Deverá salientar-se que, na decorrência dos contactos referidos, a EDP - Gestão da Produção de Energia, SA, como empresa responsável pela exploração da maior parte dos aproveitamentos hidroelétricos existentes em Portugal, desde logo incentivou a realização deste trabalho, demonstrando interesse na criação de uma ferramenta que permita prever, com antecedência e de forma fidedigna, a ocorrência de situações de cheia nos cursos de água onde estão instalados aproveitamentos hidroelétricos. Tal traduziu-se na elaboração de um protocolo entre a FEUP e a EDP, no âmbito do qual esta empresa se comprometeu a apoiar o desenvolvimento deste trabalho, nomeadamente através da disponibilização dos dados necessários para o efeito.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal da presente tese consiste, então, no desenvolvimento e aplicação de uma metodologia de previsão e alerta de cheias para bacias hidrográficas regularizadas, que possa ser aplicada de forma contínua no tempo e que permita prever a ocorrência de cheias com fiabilidade e antecedência suficientes para que, em tempo oportuno, se possam disponibilizar volumes de encaixe nas albufeiras adequados para amortecer os efeitos desses eventos. Dessa forma, poder-se-ão gerir mais eficazmente os volumes armazenados nas albufeiras de modo a: i) minimizar os impactos a jusante, quando ocorrer uma cheia, e ii) minimizar os condicionamentos das restantes funções dos aproveitamentos, quando estes eventos não forem previstos. Para tal, esta metodologia deverá ter em conta as previsões de precipitação de curto e médio prazo (até 10 dias), a variação do estado hidrológico da bacia ao longo do tempo e as características dos aproveitamentos hidráulicos existentes.

A metodologia proposta deverá, assim, servir de base para a construção de um sistema de apoio à decisão para a gestão operacional dos aproveitamentos hidráulicos em períodos de incerteza relativamente à ocorrência de cheias, que possa ter em conta a integração das responsabilidades e necessidades das seguintes entidades:

- A Agência Portuguesa do Ambiente (APA), como instituição responsável pelo acompanhamento e gestão de fenómenos hidrometeorológicos extremos;
- Agentes de Proteção Civil, envolvidos na adoção de medidas de prevenção e mitigação dos riscos das inundações;
- Empresas concessionárias dos aproveitamentos hidroelétricos, responsáveis pela gestão operacional de sistemas de albufeiras (e. g. EDP);
- Entidades responsáveis por outras utilizações das albufeiras, nomeadamente decorrentes de captações de água para abastecimento público e rega.

Com base nos propósitos anteriores e atento o caso de estudo selecionado, sintetizam-se de seguida os objetivos específicos definidos para a presente tese de investigação:

- Obtenção de dados de previsão de precipitação à escala das principais sub-bacias do rio Mondego – caso de estudo escolhido para aplicação e teste da metodologia desenvolvida – através de resultados de modelos numéricos de previsão do estado de tempo de escala global.
- Previsão de caudais de cheia em regime natural nas secções de referência das principais sub-bacias do rio Mondego – com base num modelo hidrológico calibrado tendo em conta o estado hidrológico da bacia no momento da previsão –, a dois níveis: i) previsões de curto prazo (até 24 horas); ii) previsões a médio prazo (até 10 dias).
- Proposta de regras de gestão da albufeira da Aguieira para cenários de cheias, tendo em conta a otimização dos volumes armazenados e a minimização de impactes das cheias.
- Proposta de uma metodologia geral para criação de sistemas de previsão e alerta de cheias para bacias regularizadas.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente tese encontra-se organizada em seis capítulos, aos quais se acrescentam, no final, a listagem com as referências bibliográficas da tese e cinco anexos com as informações adicionais referenciadas ao longo do texto.

O capítulo 1 corresponde a esta introdução, que abrange uma breve contextualização do tema da tese e da motivação para a escolha do mesmo, a definição dos objetivos gerais e específicos do estudo, e a descrição da organização da tese.

No capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica, com a descrição do estado geral do conhecimento relativo ao tema da tese, bem como uma breve exposição sobre as principais matérias e conceitos chave que são utilizados ao longo do trabalho.

No capítulo 3, descreve-se a metodologia desenvolvida na tese para previsão e alerta de cheias em bacias hidrográficas regularizadas, a qual consiste na especificação dos procedimentos realizados para atingir os objetivos definidos no capítulo 1.

No capítulo 4, é delimitado e caracterizado o caso de estudo e são descritas as principais características da bacia e do sistema fluvial regulado do Mondego, bem como alguns dos dados utilizados ao longo do estudo.

Nos capítulos 5 e 6 é explanada a aplicação da metodologia geral apresentada no Capítulo 3 ao caso de estudo selecionado. O capítulo 5 é dedicado aos processos inerentes à componente de previsão hidrológica, enquanto o capítulo 6 se foca na otimização da gestão operacional das albufeiras para situações de cheia. Em cada um destes capítulos, após a descrição de cada processo ou etapa da aplicação da metodologia, são apresentados os correspondentes resultados obtidos e é efetuada a análise e a discussão dos mesmos.

Por último, no capítulo 7 reúnem-se as principais conclusões obtidas do trabalho realizado e traçam-se as linhas gerais para utilização da metodologia proposta a outros casos de estudo. São ainda destacados os aspetos em que poderão ser perspectivadas melhorias futuras deste trabalho e são indicadas algumas sugestões de investigação neste âmbito.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. INTRODUÇÃO

Várias instituições internacionais têm investido na criação de sistemas de monitorização, previsão e alerta de cheias, baseados em modelos integrados, que englobam uma componente meteorológica e uma componente hidrológica (UNISDR, 2002).

Um sistema de alerta de cheias tem como função a emissão de mensagens de alerta destinadas a acionar medidas que minimizem as consequências decorrentes da ocorrência de cheias (Garrett, 2011). Para atingir esse objetivo, um sistema de alerta de cheias deve integrar diferentes componentes ou funções de base, nomeadamente o acompanhamento da evolução das condições hidrometeorológicas ao longo do tempo (precipitação, caudais e níveis hidrométricos), por um lado, e a previsão das condições futuras, por outro (UNISDR, 2002; Garrett, 2011) (Figura 1).



Figura 1. Componentes gerais de um sistema de alerta de cheias (adaptado de UNISDR (2002) e Garrett (2011)).

Como se poderá evidenciar neste capítulo, os sistemas de alerta de cheias existentes a nível global (ver secção 2.2), apesar de terem objetivos e especificidades comuns, apresentam muitas diferenças entre si, nomeadamente ao nível da estrutura ou componentes que os integram, e, a um nível mais específico, ao nível dos dados utilizados, modelos de simulação integrantes, indicadores e processos de comunicação de alertas, etc..

Muitos sistemas de alerta ainda não englobam a componente de previsão hidrometeorológica, emitindo os alertas unicamente com base no conhecimento das condições atuais e da sua evolução recente, como é o caso do SVARH, existente em Portugal. No entanto, na revisão bibliográfica aqui apresentada atribui-se especial relevância aos sistemas que integram uma componente de previsão, por serem sistemas mais completos e se enquadrarem mais especificamente no tema e objetivos da dissertação.

Segundo as Nações Unidas (UNISDR, 2002), o desenvolvimento e a operação de um sistema de previsão e alerta de cheias requerem uma combinação de dados e de ferramentas de previsão, a par da experiência de técnicos especializados, devendo ter em conta dois fatores importantes: o **tempo de antevisão de uma situação de cheia** e a **fiabilidade da previsão emitida**. Um sistema deste tipo deve fornecer informação sobre a ocorrência dos eventos de cheia com tempo suficiente para que as comunidades em risco possam reagir e minimizar os efeitos decorrentes destes eventos. Aumentar o tempo de antevisão de uma situação de cheia melhora a possibilidade de reduzir o nível de danos e perdas de vidas relativas a esses eventos. Por outro lado, as previsões devem ser também suficientemente fiáveis para promover a confiança das comunidades face aos alarmes emitidos. Se as previsões não forem precisas, então a credibilidade do sistema é questionável e as ações de resposta esperadas podem não ocorrer (UNISDR, 2002).

Após esta introdução, que corresponde a uma abordagem geral sobre a constituição e principais pressupostos dos sistemas de previsão e alerta de cheias, apresenta-se na secção seguinte (subcapítulo 2.2) uma descrição do estado do conhecimento relativo à componente de **previsão meteorológica**, referindo-se quais os conceitos e dados de base inerentes à realização deste tipo de previsões e quais os principais modelos e técnicas que os grandes centros meteorológicos internacionais utilizam para prever as condições meteorológicas futuras (ou estado do tempo).

Depois, no subcapítulo 2.3, apresenta-se uma descrição do estado da arte relativo à componente de **previsão hidrológica**, com a referência aos conceitos fundamentais relacionados com a modelação hidrológica e com uma caracterização geral dos principais programas de simulação utilizados a nível global para prever o escoamento ao longo de uma bacia hidrográfica.

Na secção seguinte (subcapítulo 2.4), apresenta-se uma breve revisão sobre as principais características de avaliação das previsões e sobre os atributos e os métodos normalmente aplicados na **análise e verificação de previsões** hidrometeorológicas.

No âmbito da **resposta** que é dada aos alertas de cheia, o subcapítulo 2.5 é dedicado a uma descrição da problemática associada à gestão operacional das albufeiras em situações de cheia e do tipo de modelos correntemente utilizados nesse âmbito.

Posteriormente, no subcapítulo 2.6, apresenta-se uma descrição geral de alguns trabalhos desenvolvidos no âmbito dos sistemas de previsão e alerta de cheias, ao nível global. Inicia-se com a referência a projetos realizados e sistemas existentes ao nível internacional, destacando-se algumas experiências europeias no desenvolvimento deste tipo de ferramentas. Dentro desta temática, descreve-se ainda, o sistema nacional utilizado para o alerta de cheias em Portugal.

Por fim, é feita uma síntese do capítulo, indicando-se as principais conclusões obtidas com a revisão bibliográfica efetuada, que serviram de base para a realização do trabalho.

2.2. PREVISÃO METEOROLÓGICA

2.2.1. NOÇÕES DE BASE

A previsão meteorológica, também designada por previsão do estado do tempo ou simplesmente previsão do tempo, nasceu da necessidade de conhecer antecipadamente as condições do tempo futuro, de modo a possibilitar a implementação de medidas de prevenção e a minimização dos impactos negativos dos fenómenos meteorológicos adversos. Por outro lado, o conhecimento do estado do tempo futuro, nomeadamente nas horas e dias seguintes, é uma informação essencial para muitas atividades humanas, como por exemplo a agricultura, a construção civil e a aviação, entre outras (Ahrens, 2005; IPMA, 2015).

O objetivo da previsão meteorológica é determinar o estado da atmosfera num instante futuro, partindo do conhecimento do estado da atmosfera num instante inicial (incluindo as suas fronteiras: a superfície terrestre e o limite superior da atmosfera) e das leis que regem o movimento da atmosfera (Ahrens, 2005; IPMA, 2015).

Em função do período de previsão, ou seja, do desfasamento entre o instante futuro a que a previsão diz respeito e o momento da sua realização e emissão, as previsões meteorológicas podem ser classificadas em (Troccoli *et al.*, 2008; WMO, 2010b):

- Previsões a muito curto prazo: até 12 horas;
- Previsões a curto prazo: de 12 a 72 horas;
- Previsões a médio prazo: de 72 a 240 horas;
- Previsões de prazo alargado: de 10 a 30 dias;
- Previsões a longo prazo: de 30 dias a 2 anos, o que inclui previsão mensal e sazonal;
- Previsões climáticas: cenários a vários anos, superiores a 2 anos.

2.2.2. MODELOS NUMÉRICOS DE PREVISÃO DO ESTADO DO TEMPO

As previsões meteorológicas são efetuadas com base na análise de resultados de modelos físico-matemáticos da atmosfera, designados por modelos numéricos de previsão do estado do tempo.

Quando a previsão meteorológica se baseia unicamente em modelos numéricos, utilizando o potencial de cálculo dos computadores para produzir uma estimativa do estado futuro da atmosfera, designa-se por Previsão Numérica do Tempo (PNT).

Os modelos numéricos de previsão do estado do tempo baseiam-se em sistemas de equações que traduzem as leis físicas que descrevem o comportamento hidrodinâmico da atmosfera (incorporadas através de códigos informáticos de grande complexidade) e que, com o auxílio do potencial de cálculo de super-computadores, e partindo do conhecimento do estado atmosférico inicial, permitem efetuar uma estimativa do estado futuro de diferentes variáveis atmosféricas, tais como a temperatura, a pressão atmosférica, o vento e a precipitação (Ahrens, 2005; Hoskins *et al.*, 2008; IPMA, 2015).

O detalhe da orografia do modelo depende sobretudo da sua resolução horizontal (WMO, 2010b; IPMA, 2015).

Quanto à escala espacial, os modelos de previsão numérica do tempo podem ser de dois tipos (WMO, 2010):

- Modelos de escala global, vocacionados para prever fenómenos cuja dimensão horizontal varia aproximadamente entre 2000 e 10000 km e cujas escalas de tempo variam entre dias e semanas (escala sinótica), efetuando previsões para todo o globo;
- Modelos de escala regional ou de área limitada, vocacionados para prever fenómenos cuja dimensão horizontal varia aproximadamente entre 2 km e 2000 km e cujas escalas de tempo variam entre 3 minutos e 2 dias (mesoscala), efetuando previsões para uma determinada região do globo.

As previsões globais a médio prazo são feitas em apenas alguns centros mundiais, tais como o *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) ou o *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dos Estados Unidos (entre outros). As previsões provenientes dos modelos destes centros estão disponíveis para todo o globo terrestre e são amplamente usadas em diversos sistemas de previsão operacionais (Fan, 2015).

Por outro lado, em muitos países são produzidas previsões regionais ou locais para alcances temporais muito mais curtos. No Quadro 1 indicam-se alguns exemplos de modelos de previsão do estado do tempo, bem como os centros meteorológicos onde são utilizados.

Quadro 1. Exemplo de modelos de previsão meteorológica e respetivos centros utilizadores.

Tipo de modelos	Designação do modelo	Centro de previsão (respetivo país)
Globais	ECMWF	ECMWF (Europa)
	GFS	NCEP – NOAA (EUA)
	JMA's GSM	JMA (Japão)
	MCGA	CPTEC (Brasil)
	ACCESS	BoM (Austrália)
	Met Office Unified Model	Met Office (Reino Unido)
	ICON Model	DWD (Alemanha)
	ARPEGE	Meteo France (França)
Regionais	ALADIN	Vários, como por exemplo IPMA (Portugal)
	AROME	Vários, como por exemplo IPMA (Portugal)
	HIRLAM	Vários, como por exemplo AEMet (Espanha)
	BRAMS	CPTEC (Brasil)
	WRF	Vários, como por exemplo: MeteoGalicía (Espanha)

Sendo a atmosfera um sistema complexo, é impossível prever o seu estado exato. A qualidade dos resultados de previsão obtidos pelos modelos numéricos é condicionada pelos seguintes fatores de erro (Cloke e Pappenberger, 2009; Cuo *et al.*, 2011; IPMA, 2015):

- incertezas inerentes às condições iniciais introduzidas no modelo – ou seja, ao conhecimento do estado da atmosfera num dado instante – resultantes dos processos de observação atmosférica e da utilização de observações irregularmente distribuídas sobre o globo;
- limitações impostas pelos modelos de previsão, de que são exemplos as aproximações aplicadas às equações e a discretização espaço-temporal do modelo, condicionadas pela capacidade dos computadores utilizados.

A grande incerteza existente nas previsões do estado do tempo faz com que, por exemplo, os resultados de duas previsões realizadas com uma diferença de horas possam ser significativamente diferentes (Fan, 2015). Além disso, dadas as limitações dos modelos numéricos, o grau de confiança nos seus resultados diminui com o prazo da previsão. Quanto maior for esse período, maior é a possibilidade de erro, ou seja, menor é a fiabilidade do modelo físico-matemático. Para superar esta limitação, foram desenvolvidos produtos que utilizam uma abordagem probabilística, nomeadamente os sistemas de previsão por *ensemble*, que permitem estabelecer uma tendência das condições meteorológicas e consequentemente aumentar, dentro de certos limites, o grau de confiança da previsão (Ramos *et al.*, 2008; Nobert *et al.*, 2010; Fan, 2015).

2.2.3. PREVISÕES POR ENSEMBLE

O conceito de previsão probabilística do estado do tempo através de Sistemas de Previsão por *Ensemble* (SPE) foi introduzido em meteorologia no início dos anos 90 e tem sido cada vez mais

utilizado em todo o mundo na previsão operacional das condições meteorológicas futuras (Ramos *et al.*, 2007; ECMWF, 2008; Cloke e Pappenberger, 2009; Nobert *et al.*, 2010; Bao *et al.*, 2011; Fan, 2015).

As técnicas de previsão por *ensemble* baseiam-se genericamente na análise de múltiplas previsões meteorológicas para o mesmo local e hora, permitindo desse modo incorporar as incertezas existentes na PNT, descritas anteriormente. A previsão por *ensemble* (ou previsão probabilística) é assim um método de previsão numérica usado para gerar uma amostra representativa de possíveis estados futuros de um sistema dinâmico. Este método é uma forma de análise de Monte Carlo: são realizadas várias previsões numéricas (previsões determinísticas) com o mesmo modelo, utilizando condições iniciais ligeiramente diferentes, adotáveis em função do conjunto de registos existente (dados passados e atuais) (Figura 2). Desta forma, é possível analisar o impacto das incertezas do modelo nas previsões realizadas no mundo (ECMWF, 2008; Ramos *et al.*, 2008; Cloke e Pappenberger, 2009; NOAA-NWS, 2011; Fan, 2015).

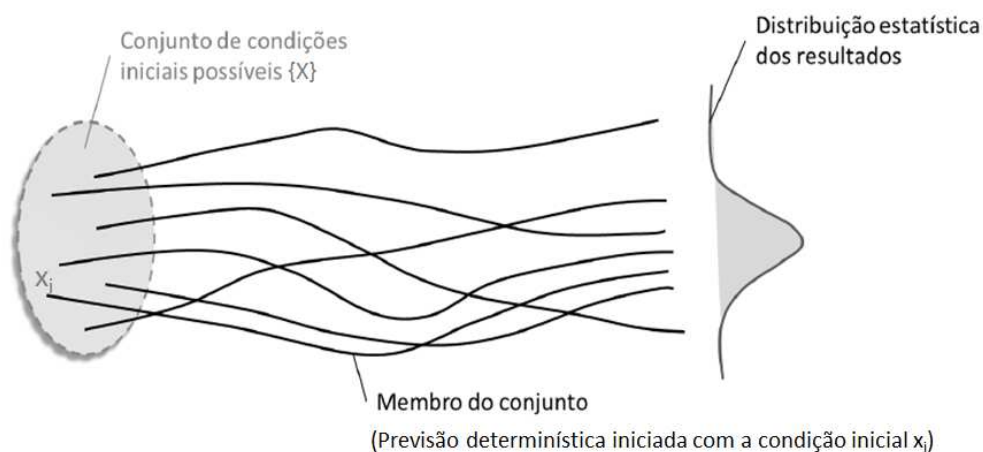


Figura 2. Representação do processo de realização de uma previsão por *ensemble* a partir de diversas condições iniciais (Fan, 2015)

O conjunto de previsões meteorológicas pode também ser construído a partir de previsões obtidas por diferentes modelos de previsão, diferentes formulações de um modelo de previsão, ou ainda a partir de previsões de diferentes centros de previsão (ECMWF, 2008; Cloke e Pappenberger, 2009).

A fim de captar as incertezas nas condições iniciais e nos parâmetros dos modelos individuais de PNT, juntamente com as incertezas na estrutura e assimilação de dados desses modelos, tem sido adotada uma estratégia que consiste em usar um “super-*ensemble*”, ou seja, utilizar vários SPE em simultâneo (Cloke e Pappenberger, 2009; Bougeault *et al.*, 2010; Fan, 2015; Fan *et al.*, 2015, Lee *et al.*, 2015). Esta estratégia motivou a criação da base de dados TIGGE (*THORPEX Interactive Grand Global Ensemble*), que visa proporcionar uma plataforma de colaboração para melhorar o desenvolvimento e compreensão das previsões meteorológicas por *ensemble* em todo o mundo (Cloke e Pappenberger, 2009; Bougeault *et al.*, 2010). Essa base de dados, estabelecida em 2006, é atualmente constituída e

alimentada por previsões de SPE provenientes de 10 centros mundiais de previsão meteorológica (Fan *et al.*, 2015; Louvet *et al.*, 2015), estando os seus dados disponíveis para investigação científica através dos portais do ECMWF e do CMA (*China Meteorological Administration*). Segundo Cloke e Pappenberger (2009), a base de dados TIGGE cobre grandes partes do globo com um detalhe adequado para previsão de cheias. Atualmente, a base de dados TIGGE é um repositório utilizado em todo o mundo para esse e para outros tipos de aplicações, como demonstram, por exemplo, os estudos realizados por Bao *et al.* (2011), Fan *et al.* (2015), Lee *et al.* (2015) e Louvet *et al.* (2015).

De acordo com Cloke e Pappenberger (2009) e conforme reiterado mais recentemente por Fan *et al.* (2015), embora globalmente as previsões do estado do tempo, e em especial da precipitação, estejam a melhorar com o auxílio dos SPE, ainda estão longe de serem perfeitas e continuam a evidenciar um grande nível de incerteza. Portanto, essas e outras técnicas de PNT necessitam ainda de progressos; além disso, o impacto dessas melhorias nos modelos hidrológicos ainda não é totalmente conhecido e é cada vez mais reconhecida a importância de se considerar as incertezas na previsão hidrológica. Por outro lado, a natureza probabilística dos SPE torna-os um produto atraente para os sistemas de previsão de cheias, porque possibilitam estender o período de previsão e quantificar melhor a fiabilidade das previsões (Cloke e Pappenberger, 2009; Bao *et al.*, 2011; Fan, 2015).

De facto, na sequência dos bons resultados do uso de SPE na previsão do tempo, observou-se a transição desta abordagem para outras disciplinas afins, como é o caso da previsão de cheias, aqui abordada. Na previsão hidrológica em geral, foi criado o projeto HEPEX (*Hydrologic Ensemble Prediction Experiment*), para investigar a melhor forma de produzir, comunicar e utilizar as previsões hidrológicas por *ensemble*, muitas vezes referidas como previsões de caudais por *ensemble* (Schaake *et al.*, 2007; Cloke e Pappenberger, 2009; Coustau *et al.*, 2015; Fan, 2015). No seu portal da internet (<http://hepex.irstea.fr/>) são apresentadas notícias e pequenos artigos relacionados com esta temática e a comunidade participante pode interagir e discutir os vários assuntos apresentados.

2.2.4. DOWNSCALING

Em geral, os atuais modelos de previsão do estado do tempo têm uma resolução horizontal de algumas dezenas a centenas de quilómetros, e a resolução adequada para estudar os processos hidrológicos ao longo de uma bacia hidrográfica é bastante menor, nomeadamente quando se trata de pequenas bacias. Portanto, e conforme já referido, em muitos casos não podem ser diretamente transpostos os resultados da PNT para as aplicações hidrometeorológicas, sendo necessário recorrer a técnicas de transferência da informação gerada pelos modelos de larga escala para escalas menores. À aplicação deste tipo de técnicas designa-se correntemente por *downscaling* (Wood *et al.*, 2004; Cloke e Pappenberger, 2009; WCRP, 2010).

As técnicas de *downscaling* podem ser agrupadas em duas grandes abordagens conceptualmente distintas: (i) utilização de modelos dinâmicos regionais, com resolução mais fina que os modelos globais; ou (ii) através de métodos estatísticos ou empíricos (Hewitson e Crane, 1996; Wood *et al.*, 2004; SCCN, 2011).

A primeira abordagem, designada por *dynamic downscaling*, consiste no uso de simulação numérica meteorológica que permita traduzir a forma como os padrões globais afetam as condições meteorológicas locais, ou seja, no uso de modelos regionais condicionados pelos resultados de modelos globais, sendo que os modelos globais fornecem as condições iniciais e as condições de fronteira para os modelos regionais (Wood *et al.*, 2004). Este tipo de *downscaling* requer dados detalhados do clima de superfície, e envolve uma grande capacidade de cálculo numérico, podendo ser um processo moroso (Hewitson e Crane, 1996; SCCN, 2011).

A utilização de métodos estatísticos ou empíricos em *downscaling* consiste em usar equações que relacionam as condições atmosféricas locais com os resultados dos modelos globais, isto é, em vez de utilizar um modelo dinâmico regional, esta abordagem aplica a informação resultante da aplicação de um modelo global à região, usando um conjunto de equações, obtidas de forma empírica, que relacionam as variações nas condições atmosféricas globais com as variações nas condições locais. As relações empíricas oferecem uma solução mais imediata e requisitos de computação significativamente menores do que a utilização de modelos dinâmicos regionais (*dynamic downscaling*) (Hewitson e Crane, 1996; SCCN, 2011). Outra vantagem dos métodos estatísticos é a possibilidade de se utilizarem resultados de modelos globais por *ensemble*, aproveitando os resultados de um conjunto de inúmeras simulações (SCCN, 2011). Na abordagem estatística ou empírica do *downscaling*, existem várias técnicas (Hewitson e Crane, 1996; Wood *et al.*, 2004; WCRP, 2010), entre as quais se pode referir, por exemplo, a utilização de redes neuronais artificiais, que permitem estabelecer relações não lineares entre a circulação atmosférica a grande escala – obtida pelos modelos globais – e a precipitação local observada, tendo sido utilizadas com bons resultados (Hewitson e Crane, 1996; Coulibaly *et al.*, 2005).

Embora o conceito e as técnicas de *downscaling* não sejam matérias novas – havendo já diversos estudos realizados neste âmbito, como os anteriormente referenciados – este campo de investigação continua na agenda da comunidade científica (Foufoula-Georgiou *et al.*, 2014; Moel *et al.*, 2015). Por exemplo, os processos de *downscaling* correntemente utilizados para pequenas áreas territoriais, realizados a partir de estimativas de larga escala dos modelos de circulação atmosférica, exigem ainda alguma investigação a nível mundial de modo a tornar as previsões meteorológicas mais fiáveis, nomeadamente no caso de previsões de fenómenos extremos (Rodrigues *et al.*, 2001; Moel *et al.*, 2015). A aplicação de técnicas de *downscaling* à variável de precipitação continua também a representar um desafio tanto do ponto de vista teórico como do prático (Foufoula-Georgiou *et al.*, 2014).

2.2.5. PREVISÃO DO ESTADO DO TEMPO EM PORTUGAL

Em Portugal, a entidade responsável pela monitorização e previsão oficial do estado do tempo é o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). Estas atividades são realizadas com base em informação nacional – com dados obtidos nas redes de observação do IPMA –, europeia e mundial que circula num circuito especializado de comunicações (IPMA, 2015).

Juntamente com o esforço europeu para o desenvolvimento da previsão numérica a curto e a médio prazo, o IPMA criou em 1993 o grupo de trabalho em PNT, integrando esta atividade no serviço meteorológico nacional. Neste contexto, Portugal é membro do centro europeu de previsão meteorológica, o ECMWF, e parceiro no Projeto Internacional ALADIN, constituído por vários grupos de previsão numérica da Europa e do Norte de África, sob coordenação da Météo-France (IPMA, 2015).

Rede nacional de observação meteorológica

A observação meteorológica é a medição ou avaliação de um ou vários elementos relativos ao estado do tempo. Em Portugal, o IPMA desenvolve um diferenciado conjunto de ações no campo da observação meteorológica e da monitorização atmosférica, no sentido de dar cumprimento aos programas de observação estabelecidos por normas nacionais e internacionais, que resultam das obrigações e compromissos do IPMA como entidade nacional responsável pela monitorização do estado do tempo (IPMA, 2015).

Neste contexto, na Figura 3 apresenta-se um esquema representativo da estrutura das redes de observação do IPMA.

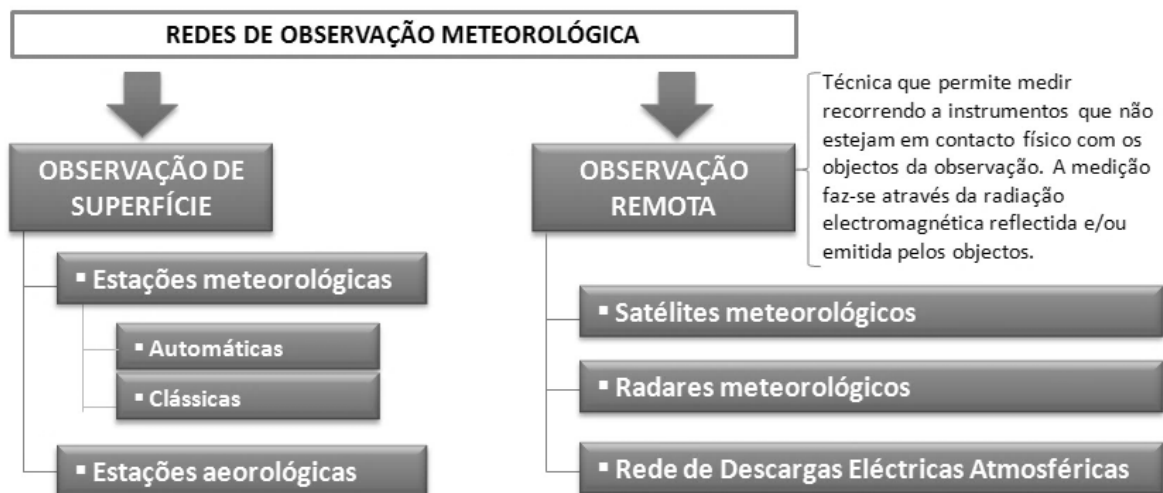


Figura 3. Estrutura constituinte das redes de observação do IPMA (IPMA, 2015).

Previsão numérica do estado do tempo no território português

O IPMA disponibiliza diariamente previsões até 10 dias recorrendo a modelos globais (com informação para todo o globo) desenvolvidos no ECMWF, e previsões até 3 dias recorrendo a modelos de área limitada desenvolvidos pelo consórcio ALADIN.

Como membro do ECMWF, o IPMA tem acesso às várias previsões globais que são realizadas nesse centro, nomeadamente previsões quantitativas de precipitação.

Em termos de previsões de curto e médio prazo, o sistema de previsão operacional do ECMWF realiza previsões determinísticas através de um modelo de alta resolução, designado por HRES, e previsões probabilísticas através de um SPE constituído por 51 membros (ou previsões individuais), designado por ENS. No Quadro 2 resumem-se as principais características das previsões realizadas por estes modelos (mais detalhes sobre os modelos são descritos em ECMWF (2015c)).

Quadro 2. Características das previsões meteorológicas de curto e médio alcance do sistema operacional do ECMWF (ECMWF, 2015 b e c).

Propriedade	HRES	ENS
Tipo de previsão	Determinística	Probabilística / por <i>ensemble</i>
Número de membros	1	51
Frequência de realização	2/ dia (às 00 e 12 UTC)	2/ dia (às 00 e 12 UTC)
Alcance temporal	10 dias	15 dias
Passo temporal	3 horas, das 0 às 144 horas 6 horas, das 144 às 240 horas	3 horas, das 0 às 144 horas 6 horas, das 144 às 360 horas
Resolução horizontal	0,125° (≈14 km)	0,25° (≈28 km), até ao 10º dia 0,50° (≈55 km), do 10º ao 15º dia

Como referido, o IPMA é também membro do consórcio ALADIN, e por isso contribui para o desenvolvimento dos modelos de área limitada produzidos por este consórcio e tem acesso aos seus códigos. Em Portugal, a versão operacional do ALADIN é executada com 9 km de resolução horizontal, para uma área que cobre a Península Ibérica e os arquipélagos da Madeira e dos Açores.

O IPMA executa ainda o modelo AROME, desenvolvido no mesmo consórcio, com uma resolução de 2,5 km, para três áreas que abrangem Portugal Continental, o Arquipélago dos Açores e o Arquipélago da Madeira. As previsões do ALADIN estão disponíveis de 1 em 1 h até 72 horas de previsão, enquanto as previsões do AROME estão disponíveis até 48 h, também com uma frequência horária (IPMA, 2015).

2.3. PREVISÃO HIDROLÓGICA

2.3.1. INTRODUÇÃO

A previsão operacional de cheias é essencial para detetar ao longo do tempo eventos extremos potencialmente danosos e para emitir atempadamente os correspondentes alertas, permitindo retirar pessoas e bens das áreas em risco e assim minimizar os danos humanos e materiais (Zappa *et al.*, 2011; Neto *et al.*, 2014). A sua importância é confirmada pela inclusão da previsão e alerta de cheias na legislação europeia, através da Diretiva Europeia de Cheias (Diretiva 2007/60/CE) (Werner *et al.*, 2009) e pelas iniciativas criadas neste âmbito pela Organização Mundial de Meteorologia – *WMO Flood Forecasting Initiative* (WMO, 2007, 2011a, 2011b e 2013).

A previsão dos caudais de cheia depende, por sua vez, da utilização de previsões de precipitação precisas e da aplicação de modelos de simulação hidrológica adequadamente calibrados. Neste contexto, é comum a utilização de previsões quantitativas de precipitação fornecidas por sistemas numéricos de previsão. Além disso, a sua incorporação num modelo de simulação hidrológica adequadamente calibrado é essencial para obter previsões de escoamento fluvial de médio prazo (até 10 dias), as quais, por sua vez, estão na base da previsão operacional atempada de cheias (Anderson *et al.*, 2002; Cuo *et al.*, 2011). Por conseguinte, a fiabilidade das previsões do escoamento depende também, em larga medida, da adequada calibração do modelo.

2.3.2. PROCESSOS HIDROLÓGICOS ENVOLVIDOS NA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

Para realizar previsões fiáveis do escoamento numa linha de água, é necessário conhecer o comportamento dos processos hidrológicos que ocorrem na sua bacia hidrográfica, que constitui um sistema natural complexo, e sobre o qual, na maioria das situações, subsistem alterações provocadas por ações humanas.

Neste contexto, a simulação hidrológica pretende representar os processos envolvidos na geração do escoamento superficial através da precipitação. Na Figura 4 representam-se esquematicamente esses processos.

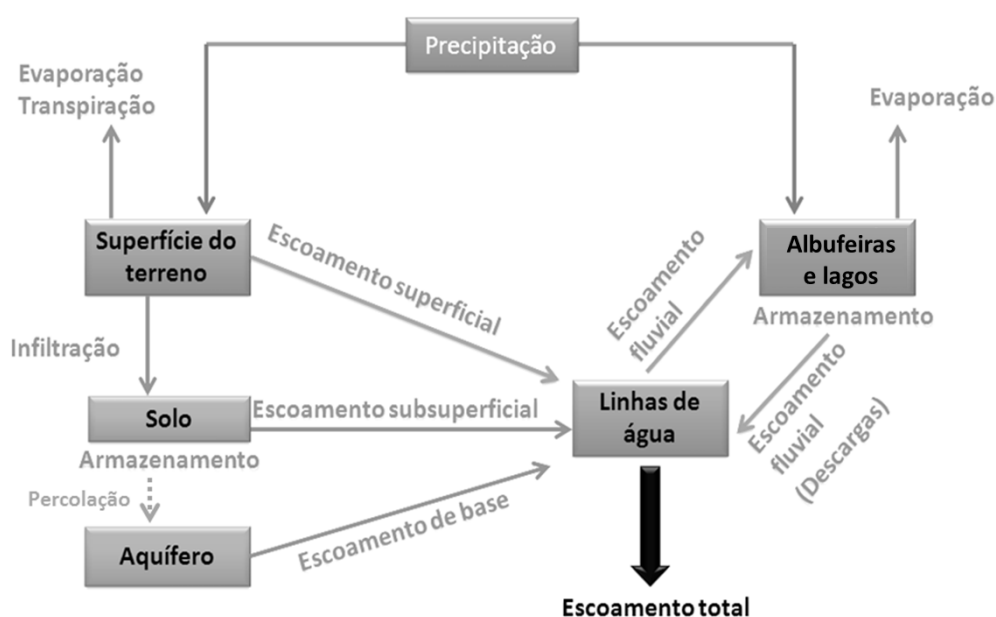


Figura 4. Processos envolvidos na geração do escoamento superficial através da precipitação (adaptado de Feldman, 2000).

À semelhança do que acontece num sistema natural, na simulação hidrológica de uma bacia, uma parte da precipitação que é definida sobre a bacia pode retornar para a atmosfera através da evaporação da superfície terrestre e das massas de água e através da evaporação e transpiração da vegetação, outra parte pode infiltrar-se no terreno (de acordo com as características de permeabilidade do solo) ou ser

intercetada em albufeiras ou depressões naturais do terreno (lagos) e outra parte escoar-se diretamente pela superfície do terreno para as linhas de água.

A água infiltrada é armazenada temporariamente nas camadas superiores do solo, parcialmente saturado. Nessa zona, a água pode: subir novamente para a superfície, por ação capilar; mover-se horizontalmente na camada superficial do solo (escoamento subsuperficial); ou percolar verticalmente para o aquífero de águas subterrâneas existente na zona da bacia. O escoamento subsuperficial, ao intercepar uma linha de água, contribui para o escoamento da mesma. A água armazenada no aquífero poderá também contribuir para o escoamento das linhas de água (escoamento base), ainda que esse processo se possa realizar (bastante) mais lentamente.

A água intercetada nas albufeiras pode também ser temporariamente armazenada (de acordo com a capacidade de armazenamento definida), mas, se não houver saídas do sistema, esta água acabará por ser descarregada nas linhas de água e contribuirá para o escoamento fluvial.

As linhas de água são um ponto de junção para o escoamento superficial, a precipitação que cai diretamente sobre as massas de água na bacia, o escoamento subsuperficial e o escoamento base. Assim, na simulação hidrológica de um sistema natural, o escoamento total nas linhas de água corresponde ao escoamento resultante à saída da bacia (Feldman, 2000; Dingman, 2002).

2.3.3. CONCEITO DE MODELO HIDROLÓGICO

Um modelo, de uma forma geral, é um meio de relacionar algo desconhecido (*output*) que se pretende conhecer, com algo conhecido (*input*) (Feldman, 2000). A maior parte dos modelos utilizados em hidrologia são denominados modelos de precipitação-escoamento, pois têm como principais dados de entrada (*input*) valores conhecidos de precipitação e como dados de saída (*output*) valores incógnitos de escoamento. Outros modelos hidrológicos permitem determinar valores de escoamento numa dada secção de uma linha de água, partindo do conhecimento dos valores de escoamento em secções a montante relativamente a essa. Assim, de um modo geral, um modelo hidrológico representa a resposta de uma bacia hidrográfica à precipitação que nela ocorre e/ou a um caudal que lhe é introduzido num ponto específico. Uma das principais aplicações destes modelos em hidrologia é a previsão de caudais de cheia e de volumes de escoamento devidos a precipitações intensas e/ou de longa duração (Moore e Bell, 2001; WMO, 2011b; Fan, 2015).

Note-se que, apesar de muitas vezes se utilizar a mesma designação, os conceitos de modelo matemático e de programa (informático) de simulação são distintos. O conceito de modelo matemático consiste na representação do comportamento de componentes de um sistema através de equações. Por exemplo, a combinação das equações de movimento e de continuidade constitui um modelo de cálculo do escoamento em superfície livre. Se as equações de um modelo são demasiado numerosas ou complexas para serem resolvidas manualmente, utiliza-se um programa de simulação, que consiste na transformação dessas equações num código informático e na utilização de um procedimento adequado à sua resolução, designado algoritmo (Feldman, 2000).

Neste contexto, adotou-se nesta dissertação a designação de **modelo ou método matemático** para as equações e métodos matemáticos que representam os fenómenos físicos, a designação de **programa de simulação** para as aplicações informáticas (ou *softwares*) que permitem a aplicação de um ou mais métodos matemáticos de forma rápida e organizada, utilizando para tal uma rotina de cálculo automático, e a designação de **modelo** para a representação da realidade física de um sistema concreto, realizada através de um modelo matemático ou de um programa informático.

Sendo a previsão de cheias o tema e o objetivo principal desta dissertação, os métodos e programas de simulação hidrológica que são alvo de referência neste trabalho cingem-se aos aspetos quantitativos da hidrologia de águas superficiais, nomeadamente para a previsão do escoamento superficial nas linhas de água com passo temporal de cálculo compatível com a natureza dos fenómenos em causa – as cheias –, ou seja, com um passo temporal na ordem das horas (ou inferior).

2.3.4. MODELOS MATEMÁTICOS DE PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO

Existem muitos métodos para simular os processos de transformação da precipitação em escoamento e escolher um deles para uso na previsão de cheias não é uma decisão simples; de facto, é quase sempre utilizado mais do que um modelo matemático para essa finalidade (Moore e Bell, 2001; WMO 2011a).

Na seleção dos métodos a utilizar, deve-se ter em conta as suas características, porque podem condicionar a forma como as previsões de escoamento são realizadas (Fan, 2015). Assim, com o objetivo de auxiliar o processo de decisão na seleção de um modelo matemático para uma determinada aplicação de hidrologia, os modelos podem distinguir-se segundo cinco categorias, em função das suas principais características e funcionalidades:

- Modelos de eventos ou contínuos: os **modelos de eventos** simulam eventos isolados, com uma duração de poucas horas a poucos dias; os **modelos contínuos** simulam longos períodos, prevendo o comportamento do sistema durante e entre eventos. Esta distinção aplica-se sobretudo a modelos que simulam processos de escoamento em bacias hidrográficas (Feldman, 2000).
- Modelos agregados, distribuídos e semi-distribuídos: nos **modelos agregados** (ou localizados), as variações espaciais (geográficas) das características e dos processos são ignoradas ou então são utilizados valores médios, e a avaliação da resposta de uma bacia é realizada apenas na sua secção de saída; nos **modelos distribuídos** essas variações são consideradas de forma explícita e discriminada, definindo os seus parâmetros através de uma malha com uma resolução estabelecida; nos **modelos semi-distribuídos** as variações espaciais são realizadas através da divisão da bacia em várias sub-bacias. A estrutura do modelo semi-distribuído tem portanto uma base física mais completa do que a do modelo agregado. Além disso, requer menor quantidade de dados de entrada para parametrização, em comparação com o modelo distribuído (Feldman, 2000; Jajarmizadeh *et al.*, 2012).
- Modelos conceptuais ou empíricos: os **modelos conceptuais** (ou fisicamente baseados) procuram reproduzir as leis físicas que regem os fenómenos, ou seja, são construídos sobre uma base de conhecimento dos processos físicos, químicos e biológicos que atuam sobre os dados de entrada

(*input*), para gerar os dados de saída (*output*); os **modelos empíricos**, por outro lado, são construídos através da observação dos dados de entrada e saída, procurando uma relação causa-efeito, sem representar explicitamente o processo de conversão (Feldman, 2000; Quintela e Portela, 2002; Jajarmizadeh *et al.*, 2012).

- Modelos determinísticos ou não determinísticos: os modelos são **determinísticos** se os dados de entrada (*inputs*), parâmetros e processos do modelo são considerados livres de variação aleatória e conhecidos com certeza, ou, por outras palavras, se uma mesma ação implica uma mesma resposta; se os modelos analisam a variação aleatória dos dados e processos utilizados e incorporam a descrição nas previsões de saída (*outputs*), os modelos dizem-se não determinísticos. Os **modelos não determinísticos** podem ser divididos em dois grupos: probabilísticos, quando as variáveis intervenientes têm um comportamento puramente aleatório e é ignorada a sequência temporal ou espacial dos valores dessas variáveis; e estocásticos, quando, para além da componente aleatória, há uma outra que permite analisar a sequência temporal ou espacial dos valores das variáveis (Feldman, 2000; Quintela e Portela, 2002; Jajarmizadeh *et al.*, 2012).
- Modelos de parâmetros medidos ou modelos de parâmetros ajustados: os modelos de parâmetros medidos são modelos cujos parâmetros podem ser determinados através das propriedades do sistema, por medição direta ou por métodos indiretos baseados em medições; os modelos de parâmetros ajustados incluem parâmetros que não podem ser medidos, sendo determinados por ajuste do modelo (calibração) com dados observados de entrada (*input*) e de saída (*output*) (Feldman, 2000).

Quintela e Portela (2002) descrevem a evolução da modelação hidrológica em Portugal, dando especial atenção aos modelos desenvolvidos e aplicados no período 1975-2000. Nesse trabalho, referem-se: (i) modelos determinísticos, destinados à análise de cheias, à simulação de escoamentos fluviais e à modelação de segmentos limitados do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas, e (ii) modelos probabilísticos e estocásticos, para previsão de acontecimentos extremos (cheias, precipitações intensas e secas), para simulação de escoamentos fluviais e para dimensionamento e gestão de albufeiras. Relativamente aos modelos referidos nesse trabalho sobre a simulação de escoamentos fluviais a partir da precipitação ocorrida, salienta-se uma utilização significativa de modelos determinísticos com escalas temporais de cálculo sobretudo diárias e mensais.

Os programas que permitem simular o comportamento de sistemas hidrológicos utilizam modelos matemáticos, mais ou menos complexos, que permitem simular cada um dos processos hidrológicos que ocorrem numa bacia hidrográfica (infiltração, evapotranspiração, escoamento subterrâneo, escoamento superficial, etc.).

Esses programas integram vários modelos matemáticos para cada um dos diferentes processos, possibilitando ao utilizador seleccionar qual ou quais os métodos que quer aplicar, como por exemplo, a utilização da equação de *Green-Ampt* ou do método do número de escoamento do *Soil Conservation Service* para determinação da precipitação efetiva (parcela da precipitação total que contribui para o escoamento superficial) (Lança e Rodrigues, 2000).

Além dos modelos matemáticos de precipitação-escoamento referidos, indicam-se no Quadro 3 outros métodos correntemente utilizados na simulação dos vários processos hidrológicos que estão na base da previsão de cheias. A listagem apresentada diz respeito aos modelos matemáticos utilizados pelo programa de simulação hidrológica HEC-HMS (descrito em 2.3.5) para o cálculo das várias componentes do escoamento distinguidas por esse programa, nomeadamente: i) o escoamento total gerado pela precipitação, ii) o escoamento subsuperficial e o escoamento à superfície do terreno; iii) o escoamento de base e iv) o escoamento ao longo das linhas de água. Cada modelo matemático presente no Quadro 3 encontra-se classificado (à direita) segundo as diferentes categorias definidas nesta secção, tratando-se todos eles de modelos determinísticos.

Quadro 3. Modelos matemáticos determinísticos utilizados pelo programa HEC-HMS na simulação de processos hidrológicos. Classificação: ME- modelo de eventos; MC - modelo contínuo; E – empírico; C - concetual; A – agregado; D - distribuído; PM – de parâmetros medidos e PA – de parâmetros ajustados (Feldman, 2000).

Componentes	Modelos matemáticos (ou métodos)	Classificação dos modelos matemáticos							
		ME	MC	E	C	A	D	PM	PA
Volume total de escoamento (<i>runoff-volume</i>)	Número de escoamento do SCS	x		x		x			x
	Número de escoamento do SCS – opção modelo distribuído	x		x			x		x
	Equação de Green e Ampt	x		x		x			x
	Inicial e taxa constante	x		x		x			x
	Deficit e taxa constante		x	x		x			x
	Quantidade de água no solo (SMA)		x	x		x			x
	Quantidade de água no solo (SMA) – opção modelo distribuído		x	x			x		x
Escoamento subsuperficial e escoamento à superfície do terreno (<i>direct-runoff</i>)	Hidrograma Unitário definido pelo utilizador	x		x		x			x
	Hidrograma Unitário de Clark's	x		x		x			x
	Hidrograma Unitário de Snyder's	x		x		x			x
	Hidrograma Unitário de SCS	x		x		x			x
	Hidrograma Unitário de ModClark	x		x			x		x
	Onda Cinemática	x			x	x		x	
Escoamento de base (<i>baseflow</i>)	Constante mensal	x		x		x		x	
	Regressão exponencial	x		x		x		x	
	Reservatório linear	x		x		x		x	
Escoamento nas linhas de água (<i>routing</i>)	Onda cinemática	x			x	x			x
	Atraso (Lag)	x		x		x		x	
	Puls modificado	x		x		x		x	
	Muskingum	x		x		x		x	
	Muskingum-Cunge (secção padrão)	x			x	x			x
	Muskingum-Cunge (secção 8 pontos)	x			x	x			x
	Confluência		x		x				x
	Bifurcação		x		x				x

2.3.5. PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

Existem diferentes programas de simulação hidrológica, produzidos por agências governamentais, universidades e empresas privadas, que oferecem múltiplas opções para os processos de simulação, diferentes níveis de complexidade e de requisitos de dados e graus de apoio técnico e formação diferenciados (WMO, 2011a; WMO, 2013). Apesar desta amplitude, estes programas envolvem um conjunto relativamente restrito de modelos matemáticos ou funções de modelação, as quais podem ser configuradas de várias maneiras diferentes, obtendo-se diferentes soluções. Este facto é ilustrado na análise realizada por Moore e Bell (2001) a vários programas de simulação hidrológica utilizados na previsão de cheias no Reino Unido e noutros países, nomeadamente: *Thames Catchment Model (TCM)*, *Midlands Catchment Runoff Model (MCRM)*, *Probability Distributed Moisture Model (PDM)*, *Isolated Event Model (IEM)*, *Transfer Function (TF) Model* e *Physically Realisable Transfer Function (PRTF) Model* e *ISO-function model*, do Reino Unido; *US National Weather Service Sacramento Model*, dos EUA; *NAM Model*, da Dinamarca; e ainda o *Grid Model*, programa baseado num modelo distribuído desenvolvido pelos autores.

Beckers *et al.* (2009) apresentam também uma revisão alargada sobre alguns programas de simulação hidrológica, dentro da qual se destacam os programas identificados no Quadro 4, que, atentas as correspondentes características descritas no trabalho em questão, se podem considerar, de uma forma geral, adequados para utilização na previsão de cheias, na medida em que permitem a simulação de escoamento superficial com um passo temporal inferior ao diário, que pode ser da ordem da hora ou do minuto, dependendo do programa.

Quadro 4. Programas com escala temporal sub-diária, analisados por Beckers *et al.* (2009).

Designação do programa	Entidade
CRHM - <i>Cold Regions Hydrologic Model</i>	<i>University of Saskatchewan</i>
DHSVM - <i>Distributed Hydrology Soil Vegetation Model</i>	<i>University of Washington</i>
HEC-HMS - <i>Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modelling System</i>	<i>US Army Corps of Engineers</i>
HSPF - <i>Hydrologic Simulation Program–Fortran</i>	<i>U.S. Geological Survey - Environment Protection Agency</i>
HydroGeoSphere	<i>University of Waterloo and Laval University</i>
MIKE-SHE	<i>DHI Water & Environment</i>
MODHMS	<i>HydroGeoLogic Software Systems</i>
SSARR - <i>Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation</i>	<i>US Army Corps of Engineers</i>
WaSiM-ETH - <i>Wasserhaushalts-Simulations-Modell</i>	<i>Eidgenössische Technische Hochschule</i>
WATFLOOD	<i>University of Waterloo</i>
VIC - <i>Variable Infiltration Capacity</i>	<i>University of Washington</i>

Embora exista uma infinidade de programas de simulação hidrológica, com diferentes nomes e marcas, suscetíveis de aplicação na previsão de cheias, a sua aplicação depende do objetivo da

simulação, de fatores geográficos e ambientais, bem como das capacidades técnicas dos utilizadores, entre outros fatores. Portanto, a escolha de um programa de simulação para aplicação na previsão de cheias deve obedecer a um processo de análise cuidadosa. Com base nesta ideia, no âmbito da *WMO Flood Forecasting Initiative*, uma equipa de especialistas desenvolveu uma ferramenta de apoio à decisão, assente numa matriz de opções, para ajudar os profissionais dos serviços hidrológicos a selecionar os programas de simulação mais adequados para as suas aplicações, sob uma série de condições diferentes, tais como, requisitos de dados, características climáticas, entre outros (WMO, 2011a, 2013). Para apoio a esse processo de decisão, foi realizada uma pesquisa sobre os programas mais comumente utilizados na previsão de cheias e catalogaram-se as suas características. Na Figura 5 apresenta-se a tabela que resume os casos analisados no âmbito da iniciativa referida (WMO, 2013), evidenciando as características e locais de aplicação desses programas.

País	Nome do representante	Programa(s) de simulação	Tipo de modelo principal (1, 2, 3, 4, 5)	Requisitos de dados (1, 2, 3, 4, 5)	Propagação fluvial (0, 1, 2)	Previsão probabilística (0, 1, 2)	Previsão de precipitação (0, 1, 2)	Esforço inst. e operacional (1, 2, 3, 4, 5)	Situação climática (1, 2, 3, 4, 5)
Filipinas	Roy Badilia	HBV + MikeFlood/11, HEC-HMS + HEC-RAS, ANUGA	2	3	2	0	0	3	1
Reino Unido	Tim Harrison	FEWS+PDM, KW, ISIS, G2G & desenvolvimentos próprios	4	5	2	1	2	5	4
África do Sul	Brink	Programa de cálculo próprio (baseado no Muskingum)	5	1	1	0	0	2	2
México	Faustino de Luna Cruz	SAMO	2	3	-	0	1	3	1
França	Caroline Witwer	Desenvolvimentos próprios	4	5	2	0	2	5	2,3,4
China	Zhou Li	XinAnjiang	1	2	1	0	1	3	2,4
EUA	William Schaffenberg	HEC-HMS	3	4	1	0	1	5	1,2,3,4
Paquistão	Muhammad Shad	FEWS, SAMO, SOBEK	2	1	2	0	2	4	1
Geral	Mike Butts	Produtos da DHI	4	4	2	-	2	4	-
Itália	Ezio Todini	TOPKAPI	3	3	2	2	2	4	4
Holanda	Eric Sprockereef	FEWS River Rhine (HBV+SOBEK)	2	4	1	2	1	5	4
Itália	Jutta Thielen	LISFLOOD	3	4	-	2	1	3	2,3,4
Finlândia	Bertel Vehvilainen	HBV-like	2	5	2	2	2	5	4
Alemanha (Baviera)	Alfons Vodelbacher	LARSIM + WAVOS + FLUX/FLORIS	2	5	2	2	2	5	3,4
Áustria	Hans Wiesenegger	FEWS, COSERO, LARSIM, DHI MIKE, HBV, HOPI, AspS	4	5	2	2	2	5	3,4
Holanda	Paolo Reggiani	REW	2	5	2	0	1	4	1
Alemanha	Dennis Meißner	WAVOS	2	4	2	2	1	4	4

Legenda:

Tipo de modelo principal :

- 1- Agregado
- 2- Semi-distribuído
- 3- Distribuído
- 4- Combinado
- 5- Apenas propagação

Requisitos de dados

- 1- Precipitação/ caudal a montante
- 2- Precipitação + alguns dados
- 3- Precipitação horária, outros dados meteo. mensais, MDT, uso do solo
- 4- Precipitação horária, outros dados meteo. horários, MDT, uso do solo, neve
- 5- Precipitação horária, outros dados meteo. horários, MDT, uso do solo, dados climáticos avançados sobre a neve

Processo de propagação fluvial:

- 0- sem propagação
- 1- Propagação hidrológica
- 2- Propagação hidráulica (Eqs. Saint-Venant e Onda Cinemática)

Processo de previsão probabilística :

- 0- sem previsão probabilística
- 1- regressão quantílica, etc.
- 2- ensembles

Previsão probabilística :

- 0- sem previsão probabilística
- 1- regressão quantílica, etc.
- 2- ensembles

Esforço institucional e operacional:

- 1- Baixo
- 2- Intermédio -baixo
- 3- Intermédio
- 4- Intermédio -elevado
- 5- Elevado

Situação climática:

- 1- Climas tropicais
- 2- Climas secos
- 3- Climas temperados suaves
- 4- Climas continentais
- 5- Climas polares

Figura 5. Resumo dos casos de aplicação estudados no âmbito do desenvolvimento da ferramenta de apoio à decisão para seleção de um programa de simulação para previsão de cheias, realizada no âmbito da *WMO Flood Forecasting Initiative* (adaptado de WMO, 2013).

Atualmente, muitos programas de simulação hidrológica são apoiados em representações digitais do terreno (módulo SIG), permitindo assim uma modelação hidrológica espacialmente distribuída, ou seja, que toma em consideração a variabilidade espacial das variáveis de entrada (*input*) (Beckers *et al.*, 2009). De uma forma geral, a modelação espacialmente distribuída é efetuada através da divisão da bacia hidrográfica numa malha de células, onde as características da bacia, parâmetros, propriedades físicas e as condições de fronteira são aplicadas no centro de cada célula, supondo-se que dentro dos limites de cada uma das células esses elementos sejam homogêneos (Szabó, 2007). Uma desvantagem deste tipo de programas é a grande quantidade de dados que a sua parametrização exige.

Um exemplo deste tipo de programas é o DIWA (*Distributed Watershed*) (Figura 6) que foi desenvolvido por Szabó (2007) na Universidade de Tecnologia e Economia de Budapeste e aplicado à maior sub-bacia do rio Danúbio – bacia do rio Tisza. As principais funcionalidades desse programa são a simulação de processos precipitação-escoamento, a análise de eventos de cheias, a análise de cenários de alterações no uso do solo e a previsão e controlo hidrológico em tempo real.

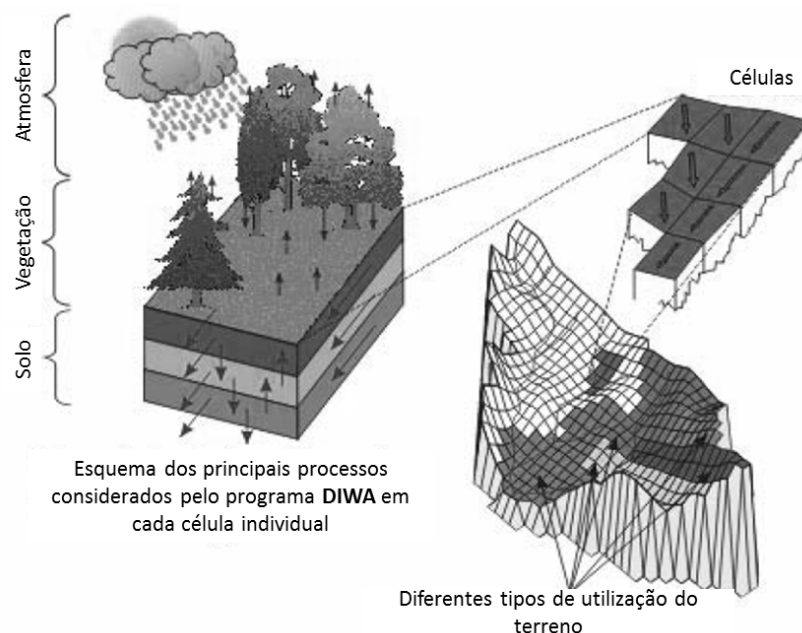


Figura 6. Representação esquemática do processo de modelação hidrológica espacialmente distribuída utilizado pelo DIWA (adaptado de Szabó, 2007).

Refere-se ainda outro programa amplamente conhecido, o *SOBEK Suite*, desenvolvido pelo Deltares – um instituto holandês independente que se dedica à investigação no domínio da água e do solo – que permite simular escoamento em tempo real com base em dados de precipitação e evapotranspiração, e que possibilita o alargamento da sua utilização a sistemas regulados, integrando ambos um módulo SIG (Deltares, 2010).

Salienta-se que a grande maioria dos programas informáticos de simulação hidrológica, comercializáveis ou não, são programas fechados ou “caixas negras”, o que muitas vezes constitui uma grande desvantagem para os seus utilizadores.

De seguida descrevem-se, com um maior grau de detalhe, dois programas: o HEC-HMS e o LISFLOOD. O primeiro é o programa de simulação hidrológica que foi escolhido para previsão das cheias no âmbito desta dissertação; o segundo é o programa utilizado ao nível europeu para simulação e previsão hidrológica em grandes bacias internacionais.

HEC-HMS

O programa HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*) é um programa de simulação hidrológica, que foi desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *US Army Corps of Engineers* (USACE) e é disponibilizado gratuitamente por essa entidade.

O HEC-HMS surgiu como uma evolução do HEC-1 que era bastante utilizado em Portugal, nomeadamente pela APA e pela EDP (Macedo e Hipólito, 1997; Brandão e Rodrigues, 1998; Profico Ambiente, 2008), as quais passaram a utilizar o novo programa após o seu surgimento, que ocorreu no início da década passada (Feldman, 2000; Rodrigues *et al.*, 2003b; Mariano, 2006; EDP, 2009).

O HEC-HMS permite simular os processos de precipitação-escoamento em bacias hidrográficas com passo temporal horário e integra opções de simulação e análise de operações em albufeiras (ou reservatórios) (Beckers *et al.*, 2009).

Para a simulação dos processos de precipitação-escoamento, o programa considera genericamente o esquema apresentado na Figura 4, embora, dependendo do objetivo da sua aplicação, possa apresentar algumas simplificações nos processos hidrológicos considerados, nomeadamente no que se refere às componentes do escoamento subterrâneo. Nas aplicações mais comuns, este programa considera apenas a presença de uma camada de solo, onde se gera o escoamento subsuperficial, e um elemento que representa o reservatório de águas subterrâneas, ou aquífero, onde se gera o escoamento de base, não considerando o armazenamento nem o movimento vertical entre esses dois elementos. Para os estudos em que é necessária uma quantificação detalhada do movimento e do armazenamento da água ao longo de todas as componentes do sistema hidrológico, o HEC-HMS inclui o modelo matemático designado por *Soil Moisture Accounting* (SMA). Neste caso, para simulação da componente subterrânea do escoamento, o modelo considera três reservatórios interligados: o superior representa a camada superior de solo, onde se gera o escoamento subsuperficial; e dois reservatórios inferiores representam dois níveis de armazenamento subterrâneo.

O HEC-HMS possibilita várias opções de entrada de dados, nomeadamente da precipitação, e que podem ser, por exemplo: dados de eventos específicos ou séries de dados contínuas, correspondentes a dados pontuais, referentes a estações udométricas; ou dados distribuídos, como por exemplo, dados de radar ou dados obtidos por previsão numérica. Como referido em 2.4.3, os modelos de que o HEC-HMS dispõe para o cálculo do escoamento são os apresentados no Quadro 3 (Feldman, 2000).

O HEC-HMS inclui também uma componente de calibração automática, que permite estimar alguns parâmetros do modelo e as condições iniciais, com base em dados de condições hidrometeorológicas observadas (Feldman, 2000).

Para auxiliar a introdução e visualização de dados e de resultados no HEC-HMS, existem várias aplicações informáticas desenvolvidas pela mesma entidade, como por exemplo a aplicação HEC-GeoHMS (*Geospatial Hydrologic Modelling Extension*), que permite uma conexão entre este programa de simulação hidrológica e o sistema de informação geográfica ArcGIS (Beckers *et al.*, 2009; Fleming e Doan, 2013), e a aplicação HEC-DSSVue para armazenamento e gestão de dados (King, 2010)

LISFLOOD

O LISFLOOD é o programa de simulação hidrológica desenvolvido pelo *Joint Research Centre* (JRC) da Comissão Europeia e é parte integrante do Sistema Europeu de Alerta de Cheias (*European Flood Alert / Awareness System - EFAS*), descrito em 2.6.1.1. Este programa tem por base um sistema de informação geográfica, estando preparado para simular de uma forma distribuída os processos hidrológicos em grandes bacias hidrográficas. Além disso, contém opções especiais para simular sistemas fluviais regulados (operações em albufeiras) (Van Der Knijff *et al.*, 2010; EFAS, 2015).

O esquema geral de funcionamento do LISFLOOD é ilustrado na Figura 7, onde se exibem os processos hidrológicos considerados por esse programa e o seu encadeamento. Como se pode observar, o LISFLOOD considera, genericamente, os seguintes processos: (i) a influência da vegetação na geração de escoamento; (ii) a existência de duas camadas de solo, onde se processam apenas transferências verticais (evaporação, transpiração e infiltração); (iii) a existência de dois reservatórios subterrâneos ligados entre si, e dispostos um superiormente ao outro, onde se geram diferentes parcelas de escoamento subterrâneo que, a diferentes ritmos (escoamento rápido na zona superior e lento na zona inferior), drenam para as linhas de água; (iv) a introdução de perdas de água do sistema; e, (v) o cálculo das propagação do escoamento à superfície e nas linhas de água (Van Der Knijff *et al.*, 2010; EFAS, 2015).

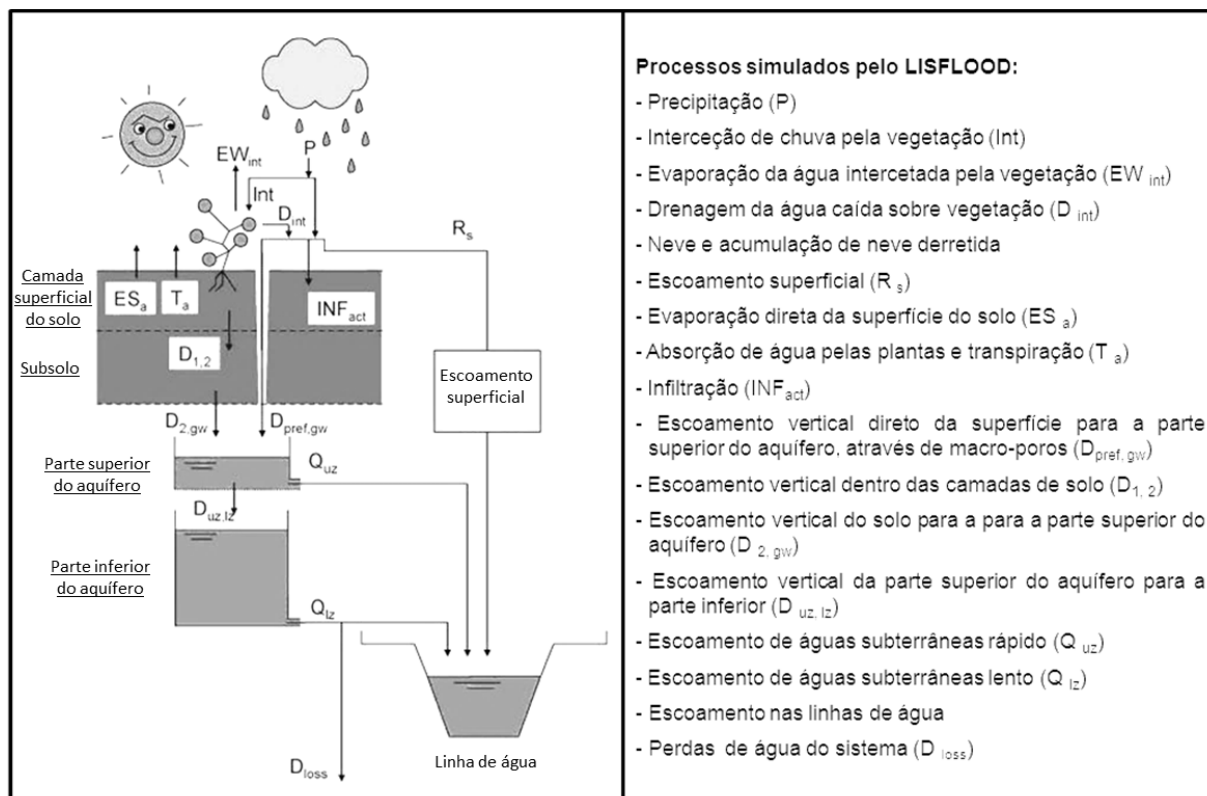


Figura 7. Representação genérica dos processos hidrológicos considerados pelo LISFLOOD (adaptado de Van Der Knijff *et al.*, 2010 e EFAS, 2015).

O objetivo específico para o desenvolvimento do LISFLOOD foi produzir uma ferramenta que pode ser usada em grandes bacias internacionais numa variedade de aplicações, nomeadamente a previsão de cheias e a avaliação dos efeitos das medidas de regulação dos rios, das mudanças no uso do solo e das alterações climáticas (Van Der Knijff *et al.*, 2010; EFAS, 2015).

2.3.6. CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

O sucesso da aplicação de modelos hidrológicos para a realização de previsões de escoamento requer procedimentos objetivos e adequados de calibração e de verificação do modelo (Ritter e Muñoz-Carpena, 2013).

A calibração de um modelo hidrológico consiste na estimação dos valores dos parâmetros do modelo que otimizam a sua: i) robustez científica e ii) representatividade dos resultados reais dos processos hidrológicos subjacentes. Tipicamente, a calibração é efetuada comparando os resultados ou previsões do modelo (*outputs*) com os valores dos caudais observados nas secções de referência das unidades de análise (ou sub-bacias) definidas no modelo, sob um mesmo conjunto de pressupostos (por exemplo, período temporal, condições meteorológicas, humidade do solo). O processo de verificação do modelo consiste depois em executar o modelo para conjuntos de pressupostos distintos, utilizando os valores dos parâmetros do modelo estimados na fase de calibração (Yapo *et al.*, 1996; Refsgaard, 1997; Gupta

e Sorooshian, 1998; Gupta *et al.*, 1999; Boyle *et al.*, 2000; Anderson *et al.*, 2002; Moriasi *et al.*, 2007; WMO, 2011b; Neto *et al.*, 2014). Segundo as recomendações da WMO (WMO, 2011b), o período considerado para a verificação dos modelos hidrológicos utilizados para a previsão de cheias deve ser suficientemente longo para incorporar vários eventos de cheia observados.

Para avaliar o desempenho de um modelo – ou seja, para avaliar o grau de conformidade entre os resultados estimados pelo modelo e os correspondentes dados observados – existem vários métodos, que são utilizados nos processos de calibração e de verificação do mesmo. Como cada um desses métodos contém limitações e muitas vezes produz indicações ambíguas, vários autores recomendam que essa avaliação do desempenho seja realizada através da combinação de vários métodos, que devem incluir, para além de uma análise gráfica dos resultados, a utilização de indicadores de desempenho ou medidas estatísticas de quantificação do erro total e da qualidade do ajuste (Krause *et al.*, 2005; Moriasi *et al.*, 2007; Ritter e Muñoz-Carpena, 2013; Nyeko, 2015).

A análise gráfica, que consiste na comparação dos hidrogramas resultantes de uma simulação com os correspondentes hidrogramas observados, é um processo amplamente utilizado para avaliar o desempenho de uma simulação, permitindo, de uma forma rápida e qualitativa, avaliar o grau de correspondência (ou semelhança) entre os resultados obtidos e as respetivas observações (Moriasi *et al.* 2007; WMO, 2011b; Ritter e Muñoz-Carpena, 2013).

Relativamente aos indicadores de desempenho do modelo, a bibliografia recomenda a utilização de, pelo menos, um indicador de quantificação do erro total absoluto e de um indicador adimensional (ou indicador do erro relativo) para quantificar a qualidade do ajuste dos resultados (Ritter e Muñoz-Carpena, 2013).

Moriasi *et al.* (2007) apresentam uma revisão da literatura sobre este tema e, baseando-se em recomendações de métodos de avaliação de modelos hidrológicos efetuadas em diferentes estudos, sugerem três indicadores estatísticos para avaliar de forma quantitativa os resultados de uma simulação: i) indicador de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), ii) a percentagem de viés (PBIAS), e iii) o rácio entre o erro médio quadrático e o desvio padrão dos dados medidos (RSR).

A WMO (2011b) indica também, como indicadores comuns para este tipo de verificação, os dois primeiros referidos acima sugeridos por Moriasi *et al.* (2007), e acrescenta mais quatro: i) o erro médio quadrático (RMSE), ii) a média do erro absoluto (AAE); iii) a variância explicada (EV); iv) e o coeficiente de determinação (R^2).

No Quadro 5 apresenta-se uma síntese de seis estudos analisados – entre os quais dois tiveram como objetivo específico a previsão de cheias –, onde se procurou identificar: quais os indicadores de desempenho mais utilizados; onde e para que efeitos; e quais os valores de referência normalmente aplicados para classificar o desempenho das simulações. Entre os indicadores mais utilizados para avaliar o desempenho dos modelos hidrológicos, destaca-se o indicador de eficiência de Nash-Sutcliffe (referido por Ritter e Muñoz-Carpena (2013) e verificado pela análise bibliográfica efetuada).

Quadro 5. Resumo da análise de seis estudos sobre a utilização de indicadores de desempenho na calibração e verificação de modelos hidrológicos.

Estudo	Moriasi <i>et al.</i> , 2007	Chu e Steinman, 2009	Yilmaz <i>et al.</i> , 2010	Tiwari e Chatterjee, 2010	Andrade <i>et al.</i> , 2013	Fan, 2015
Objetivo	Simulação do escoamento fluvial e do transporte de sedimentos e nutrientes.	Comparação de simulação de eventos (SE) com simulação contínua (SC).	Previsão de escoamento provado pelo degelo.	Previsão horária de cheias	Gestão dos Recursos Hídricos	Previsão de cheias
Programa de simulação	SWAT2005	HEC-HMS	HEC-HMS e LBRM	WBANN	SWAT	MGB-IPH
Passo temporal	Mensal e diário	5 minutos (SE) /horário (SC)	Diário	Horário	Diário	Horário
Período de simulação	13 anos	3 a 5 dias (SE) / 5 meses (SC)	≈ 2 e 5 anos	3 meses	3.5 anos	≈ 5 anos
Área da bacia e localização	Leon River (EUA) 9300 km ²	Mona Lake (EUA) 191.64 km ²	Karasu Basin (Turquia) 10215 km ²	Mahanadi River (India) 141589 km ²	Alto Rio Grande (Brasil) 32 km ²	Três Marias 50.000 km ² Rio Doce 83.000 km ² Rio Tocantins 310.000 km ² (Brasil)
Indicadores de desempenho avaliados	<ul style="list-style-type: none"> • NS • PBIAS • RSR 	<ul style="list-style-type: none"> • NS • NOF 	<ul style="list-style-type: none"> • NS • RMSE • LRC 	<ul style="list-style-type: none"> • NS • RMSE • MAE • PERS 	<ul style="list-style-type: none"> • NS • PBIAS 	<ul style="list-style-type: none"> • NS • NSlog • ΔV
Valores de referência de desempenho satisfatório	NS>0,5 PBIAS <25% RSR<0,7	Valores ótimos: NS=1 NOF=0	Valores ótimos: NS=1 NOF=0 LRC=1	Valores ótimos: NS=1 RMSE=0 MAE=0 PERS=1	NS>0,5 PBIAS <25%	Valores ótimos: NS=1 NSlog=0 ΔV=0
Legenda de indicadores: <ul style="list-style-type: none"> ▪ NS – eficiência de Nash-Sutcliffe; ▪ NSlog – eficiência de Nash-Sutcliffe logarítmica ▪ PBIAS – percentagem de viés; ▪ RMSE – erro médio quadrático; ▪ RSR - rácio entre o erro médio quadrático e o desvio padrão dos dados medidos; ▪ MAE – erro médio absoluto; ▪ NOF – Função objetivo normalizada; ▪ LRC - Coeficiente de regressão linear (LRC) ▪ MAE - Erro médio absoluto (MAE) ▪ PERS - Índice de Persistência (PERS) ▪ ΔV - erro relativo de volume total dos hidrogramas 						

Relativamente aos processos de calibração de modelos hidrológicos, a maioria dos estudos já desenvolvidos concentraram-se na pesquisa de procedimentos automáticos (algoritmos de otimização) para a estimação e ajuste dos parâmetros do modelo e avaliação do respetivo desempenho num período temporal específico, através da aferição do grau de precisão e incerteza associadas aos resultados assim obtidos (Yapo *et al.*, 1996; Refsgaard 1997; Gupta *et al.*, 1998; Gupta *et al.*, 1999; Boyle *et al.*, 2000; Doherty e Johnston 2003; Madsen 2003; Abbaspour 2005; Moriasi *et al.*, 2007;

Tiwari e Chatterjee 2010; Yilmaz *et al.*, 2010; Neto *et al.*, 2014; Fonseca *et al.*, 2014). Relativamente a procedimentos automáticos de calibração, Matos (2014) descreve processos baseados na otimização de um único objetivo, na otimização de múltiplos objetivos e em técnicas Bayesianas.

Adicionalmente, quando se pretende aplicar um modelo hidrológico, de forma sistemática, na previsão operacional do escoamento fluvial, o processo de calibração deve também ter em conta a variação dos parâmetros do modelo ao longo do tempo, nomeadamente em resultado de alterações no estado meteorológico e nas condições da bacia hidrológica. Para este efeito, a calibração do modelo deve ser realizada sob um amplo leque de condições iniciais, pelo que raramente é obtido um valor único para cada parâmetro ajustado (Doherty e Johnson, 2003; Matos, 2014). Devido à acentuada variabilidade das condições hidrológicas que pode ser observada numa bacia hidrográfica (desde a seca extrema a condições altamente húmidas), o desenvolvimento de um processo de calibração adequado para fins de previsão operacional de cheias é uma matéria complexa e que tem permanecido na agenda de investigação (Mendes e Maia, 2015a e 2015b).

2.3.7. UTILIZAÇÃO DE PREVISÕES DE PRECIPITAÇÃO POR *ENSEMBLE* NA PREVISÃO DE CHEIAS

Muitos sistemas de previsão de cheias dependem de *inputs* de precipitação, obtidos principalmente a partir de estações meteorológicas (pluviómetros) e de radar. No entanto, para previsões de médio prazo são usados os resultados de modelos de Previsão Numérica do estado do Tempo (PNT), especialmente quando não estão disponíveis registos de caudais numa secção de montante do rio ou quando o equipamento de medição ou de transmissão de dados falhar – situações que acontecem frequentemente quando ocorrem cheias extremas. Em geral, os resultados da PNT são essenciais para estabelecer períodos de previsão maiores que o tempo de concentração da bacia, mas mesmo para períodos de previsão menores esses dados proporcionam um valor acrescentado na estimativa dos caudais de cheias afluentes a uma dada secção (Cloke e Pappenberger, 2009).

Por todo o mundo, há diversos sistemas operacionais de previsão de cheias que recorrem a previsões numéricas do estado do tempo por *ensemble* (ver Quadro 6), em vez de utilizar simplesmente previsões determinísticas. Em geral, tal envolve a utilização de um SPE como entrada para um modelo hidrológico, realizando-se dessa forma diferentes previsões de caudais afluentes. Como os resultados de previsão obtidos por um SPE não correspondem diretamente aos dados meteorológicos de *input* requeridos pelos modelos hidrológicos, geralmente é necessário efetuar um pré-processamento e tratamento dos dados, nomeadamente na compatibilização das escalas temporais e espaciais, de modo a ser possível utilizar esses dados na previsão de cheias. A esta metodologia está também frequentemente associado um sistema de apoio à tomada de decisão (Cloke e Pappenberger, 2009).

Quadro 6. Exemplos de sistemas de previsão de cheias, e respetivos de centros de previsão hidrológica, que utilizam previsões meteorológicas por *ensemble* (SPE) como entrada (Cloke e Pappenberger, 2009).

Sistemas / Centros de previsão de cheias	Sistemas de previsão meteorológica por <i>ensemble</i> utilizados como entrada na previsão de cheias *
European Flood Alert System (EFAS) - European Commission - Joint Research Centre	ECMWF; COSMO-LEPS **
Georgia-Tech/Bangladesh Project	ECMWF
Finnish Hydrological Service	ECMWF
Swedish Hydro-Meteorological Service	ECMWF
Advanced Hydrologic Prediction Services (AHPS) - NOAA	US National Weather Service (NOAA)
MAP D-PHASE (Alpine region) / Switzerland	COSMO-LEPS
Vituki (Hungary)	ECMWF
Rijkswaterstaat (The Netherlands)	ECMWF; COSMO-LEPS
Royal Meteorological Institute of Belgium	ECMWF
Vlaamse Milieumaatschappij (Belgium)	ECMWF
Météo France	ECMWF; Arpege EPS
Land Oberoesterreich, Niederoesterreich, Salzburg, Tirol (Austria)	Aladin (integrando dados do ECMWF)
Bavarian Flood Forecasting Centre	COSMO-LEPS

* Note-se que nem todas as previsões por *ensemble* estão disponíveis ao público.

** COSMO-LEPS: Consortium for Small-Scale Modelling – Limited-area Ensemble Prediction System.

Cloke e Pappenberger (2009) fizeram uma revisão bibliográfica sobre esta temática e concluíram que os estudos de casos publicados na literatura dão boas indicações sobre o valor acrescentado da utilização de SPE nas previsões de cheias a médio prazo, particularmente na capacidade de emitir alertas de inundação mais cedo e com mais confiança. No entanto, os autores consideraram que o suporte de evidências era ainda insuficiente, sendo necessários muitos mais casos de estudo, mostrando aplicações de natureza mais quantitativa, em particular na quantificação dos alarmes falsos e da incerteza.

Em resultado dos benefícios da utilização de SPE na previsão de cheias, demonstrados pelos estudos recentemente desenvolvidos, têm surgido por todo o mundo novos sistemas operacionais (Demargne *et al.*, 2014; Fan, 2015). No portal da internet do HEPEX, já referido em 2.2.3, Pappenberger *et al.* (2013) apresentaram uma compilação desses sistemas.

Segundo Demargne *et al.* (2014), apesar de haver uma série de casos de estudo que demonstraram os potenciais benefícios dos sistemas de previsão hidrológica baseados em SPE, o desenvolvimento e a implementação desses sistemas ainda está em curso e, portanto, a experiência operacional que existe ainda é muito limitada.

2.4. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DE PREVISÕES

2.4.1. INTRODUÇÃO

Qualquer sistema de previsão, seja determinístico ou probabilístico (por *ensemble*), está sujeito a diferentes tipos de erros. O conhecimento da qualidade e dos fatores de incerteza subjacentes ao sistema de previsão é, portanto, essencial para que a utilização das previsões em termos operacionais possa ser considerada credível.

A avaliação da qualidade de um sistema de previsão consiste genericamente em medir o grau de correspondência entre previsões e ocorrências, ou seja, entre os valores previstos e os valores observados correspondentes. A avaliação da qualidade corresponde à verificação das previsões.

Além da qualidade, um sistema de previsão pode ser avaliado sob outras perspectivas (ver Figura 8). Segundo Murphy (1993), para qualificar um sistema de previsão é necessário avaliar também as seguintes propriedades: i) consistência, que consiste no grau de concordância entre previsões, e ii) valor, definido como o grau de utilidade das previsões em termos económicos ou de outros benefícios mensuráveis.

Quais são as características de uma boa previsão?	
Qualidade	Grau de correspondência entre previsões e ocorrências, ou entre os valores previstos e os valores observados correspondentes. A avaliação da qualidade corresponde à verificação das previsões.
Consistência	Grau de concordância entre previsões: i) previsões numéricas vs. humanas ; ii) previsões consecutivas, realizadas em instantes diferentes; iii) diferentes previsões realizadas no mesmo instante (<i>ensemble</i>).
Valor	Grau de utilidade em termos económicos ou de outros benefícios mensuráveis .

Figura 8. Características de avaliação das previsões.

Para Murphy (1993), a consistência corresponde à diferença entre previsões obtidas através de um modelo numérico e os resultados esperados por quem realiza a previsão (previsor). Esta propriedade foi depois conceptualizada de outra forma por Pappenberger *et al.* (2011a), considerando a consistência como sendo o grau de concordância entre previsões consecutivas.

O valor é também uma propriedade importante de um sistema de previsão, pois corresponde ao resultado esperado da sua utilização em termos efetivos. Duas previsões podem ter qualidades idênticas e valores distintos, caso ambas produzam efeitos diferenciados quando aplicadas a um uso específico.

As três características referidas – qualidade, consistência e valor – estão intimamente interligadas e positivamente correlacionadas, isto é, normalmente um sistema de previsão que apresenta bons resultados numa das propriedades também tende a apresentar bons resultados nas outras (Murphy, 1993; Roebber *et al.*, 1996; CAWCR, 2015, Fan, 2015).

2.4.2. VERIFICAÇÃO DE PREVISÕES

A verificação de previsões é o processo de avaliação da qualidade de um sistema de previsão. Normalmente, integra duas atividades principais: i) a verificação de diagnóstico e ii) a verificação em tempo real. A primeira tem como objetivo caracterizar a qualidade das previsões passadas para poder melhorar os sistemas e os processos de previsão. A segunda consiste em analisar a qualidade das previsões ao longo do tempo, criando um arquivo histórico para ajudar os previsores e os utilizadores finais a estimar – a partir da qualidade de previsão em situações históricas análogas – a qualidade de uma previsão antes do resultado ser observado. Esta avaliação pode levar a ajustar a previsão ou a sua utilização numa dada aplicação (Demargne *et al.*, 2009; Brown *et al.*, 2010; Demargne e Brown, 2013).

A verificação permite analisar aspetos importantes das previsões, tais como: i) em que medida são adaptadas a uma determinada aplicação, ii) quais são as suas principais fontes de incerteza e de erro, iii) quais são os seus principais pontos fracos e iv) onde se deve investir mais em superá-los. Neste sentido, as previsões por *ensemble* contêm mais informação que as previsões determinísticas, pois incluem dados sobre a incerteza que lhes está associada (Fan, 2015).

Existem muitos atributos da qualidade de previsões que podem ser avaliados através de métodos de verificação específicos (Quadro 7). Neste contexto, atributo refere-se a uma dimensão específica da qualidade, tal como a confiança das probabilidades de previsão. Os atributos importantes da qualidade de previsão são obtidos através da análise da função de distribuição de probabilidade conjunta (pdf) das previsões, Y , e observações, X , $f(X,Y)$. Descrições mais detalhadas sobre os atributos da qualidade das previsões podem ser encontradas em Bradley *et al.* (2003 e 2004), Jolliffe e Stephenson (2003), Wilks (2006), Demargne *et al.*, (2010), Demargne e Brown (2013) e CAWCR (2015).

A utilidade de um sistema de previsão depende de vários atributos de qualidade de previsão. No entanto, para uma determinada aplicação das previsões, alguns atributos podem ser mais importantes que outros. Por exemplo, no que respeita à identificação de situações de cheia, é particularmente importante a capacidade de discriminação dos caudais de cheia, porque os alertas de cheia só são eficazes se forem consistentemente corretos (UNISDR, 2002; Demargne e Brown, 2013; Brown *et al.*, 2010). Em contrapartida, para a gestão operacional corrente de uma albufeira é importante que o viés das previsões seja reduzido, ou seja, que os volumes previstos ao longo do tempo sejam tão próximos quanto possível dos valores observados (Fan, 2015).

Quadro 7. Atributos e métodos estatísticos normalmente aplicados na verificação de previsões hidrometeorológicas determinísticas e/ou probabilísticas (*ensemble*), focadas (S) ou não (N) na superação de um determinado limiar (adaptado de Demargne e Brown, 2013, com inclusão de métodos propostos por Brown *et al.*, 2010).

Atributo de qualidade	Métodos estatísticos de verificação	Tipo de previsão	
<u>Erro</u> - Diferença entre as previsões e as observações	<i>Mean Absolute Error</i>	Determinística	N
	<i>Mean Square Error</i>	Determinística	N
	<i>Root Mean Square Error</i>	Determinística	N
	<i>Mean Continuous Rank Probability Score</i>	<i>Ensemble</i>	N
	<i>Brier Score</i>	<i>Ensemble</i>	S
	<i>Critical Success Index / Threat Score</i>	Ambas	S
<u>Viés</u> - Erros sistemáticos na comparação entre as previsões e as observações	<i>Relative Mean Error / Relative Bias</i>	Determinística	N
	<i>Frequency Bias</i>	Ambas	S
<u>Correlação</u> - Relação linear entre as previsões as observações	<i>Pearson Correlation Coefficient</i>	Determinística	N
	<i>Spearman Rank Correlation</i>	Determinística	N
	<i>Correlation Coefficient</i>	Determinística	N
<u>Desempenho relativo</u> - Medida do desempenho de um sistema em comparação com outro de referência	<i>Mean Absolute Error Skill Score</i>	Determinística	N
	<i>Mean Square Error Skill Score</i>	Determinística	N
	<i>Mean Continuous Rank Probability Skill Score</i>	<i>Ensemble</i>	N
	<i>Brier Skill Score</i>	<i>Ensemble</i>	S
	<i>Equitable Threat Score / Gilbert Skill Score</i>	Ambas	S
<u>Confiança</u> - Nível de concordância entre as observações e as respetivas previsões, para um ou mais subconjuntos de dados de verificação (viés condicional)	<i>Mean CRPS Reliability</i>	<i>Ensemble</i>	N
	<i>Brier Score Reliability</i>	<i>Ensemble</i>	S
	<i>Reliability Diagram</i>	<i>Ensemble</i>	S
	<i>Rank Histogram</i>	<i>Ensemble</i>	S
	<i>Success Ratio</i>	Ambas	S
	<i>Mean Error of Probability Diagram</i>	<i>Ensemble</i>	S
	<i>Spread-Bias Diagram (SBD)</i>	<i>Ensemble</i>	S
	<i>Mean Capture Rate Diagram</i>	<i>Ensemble</i>	N
<u>Resolução</u> - Capacidade da previsão para classificar um conjunto de eventos observados em subconjuntos com distribuições de frequências diferentes	<i>Mean CRPS Resolution</i>	<i>Ensemble</i>	N
	<i>Brier Score Resolution</i>	<i>Ensemble</i>	S
<u>Discriminação</u> - Capacidade de um sistema em prever a ocorrência de um evento discreto, como a superação ou não de um dado limiar.	<i>Relative Operating Characteristic Score</i>	Ambas	S
	<i>Relative Operating Characteristic Diagram</i>	Ambas	S
	<i>Probability of Detection / Hit Rate</i>	Ambas	S
	<i>False Alarm Rate / False Detection Probability</i>	Ambas	S
<u>Acuidade</u> - Tendência de um sistema em prever probabilidades extremas (0 ou 1)	<i>Forecast Frequency Histogram</i>	<i>Ensemble</i>	S

Como se pode observar no Quadro 7, para avaliar um dado atributo de qualidade existem vários métodos, alguns dos quais são aplicáveis apenas a previsões determinísticas, outros apenas a previsões por *ensemble*, existindo alguns aplicáveis aos dois tipos de previsões. Se as previsões por *ensemble* forem representadas por uma medida de posição – como a média ou um percentil da distribuição do conjunto, por exemplo – podem ser aplicados também os métodos específicos para previsões determinísticas. No entanto, os métodos que se focam especialmente nas previsões por *ensemble* permitem explorar melhor as características relacionadas com a incerteza das previsões. Ainda no que diz respeito aos métodos de avaliação da qualidade das previsões, alguns são aplicáveis à previsão de eventos discretos, como por exemplo a ocorrência ou superação de um determinado limiar definido para uma variável, enquanto os outros se aplicam apenas à previsão de variáveis contínuas. Embora estes métodos tenham tido origem na meteorologia, atualmente são também bastante utilizados para avaliar previsões hidrológicas (Brown *et al.*, 2010; Demargne e Brown, 2013; Fan, 2015).

A verificação estatística exaustiva das previsões por *ensemble* deve, desta forma, incorporar várias dimensões, nomeadamente: a função de distribuição; medidas de posição ou de tendência central; erros da distribuição; e probabilidade de ocorrência de eventos. Em geral, a verificação de previsões por *ensemble* baseada somente em medidas de tendência central é inadequada, pois negligencia informações importantes relacionadas com incertezas trazidas pelo conjunto, como por exemplo a dispersão dos seus membros (ou previsões individuais) (Brown *et al.*, 2010; Fan, 2015).

Para verificar previsões por *ensemble* de variáveis numéricas contínuas, tais como temperatura, caudais e precipitação, o NOAA's *National Weather Service* desenvolveu uma aplicação que permite aplicar de forma automática vários dos métodos de verificação apresentadas no Quadro 7 – que normalmente são mais utilizadas internacionalmente ao nível operacional (Brown *et al.*, 2010) – o *Ensemble Verification System* (EVS). Trata-se de uma aplicação informática Java de utilização livre e que pode ser executada em qualquer sistema operativo.

Na bibliografia existente (por exemplo em: Brown *et al.*, 2010; CAWCR, 2015; Fan, 2015) são descritos os resultados que permitem qualificar, segundo cada tipo de método estatístico, uma previsão como ótima. No entanto, não foram encontrados critérios de referência para classificar a qualidade das previsões, para toda a amplitude de resultados possíveis desses métodos.

2.5. GESTÃO OPERACIONAL DE ALBUFEIRAS

As albufeiras permitem a redistribuição espacial e temporal do fluxo de água dos rios, estando a gestão operacional das mesmas subordinada a múltiplos objetivos (Simonovic, 1992; Ahmad e Simonovic, 2000), que podem incluir, por exemplo, o fornecimento de água para a agricultura ou para utilização urbana, a produção de energia hidroelétrica, a navegação, a utilização para fins de recreio, bem como o controlo de cheias (Fayaed *et al.*, 2013).

Devido aos conflitos que podem existir na satisfação das várias utilizações, a gestão de albufeiras pode ser problemática para os seus operadores, sendo que a natureza estocástica das afluições tende a acentuar esta complexidade (Faber e Stedinger, 2001; Fayaed *et al.*, 2013).

Na gestão das situações de cheia, uma tarefa essencial é a determinação de uma estratégia eficaz de operação das albufeiras que minimize os danos a jusante, mantendo a segurança da barragem dentro de limites razoáveis e maximizando o volume de água armazenada no final do evento. Nesta perspetiva, um modelo de gestão de albufeiras é uma peça chave num sistema de previsão e de apoio à decisão em situações de cheia, pois permite avaliar várias alternativas de gestão e determinar qual a estratégia mais eficaz (Ibanez *et al.*, 2011; Seibert *et al.*, 2014). Ainda assim, são poucos os sistemas de previsão existentes que contêm essa componente (Seibert *et al.*, 2014).

Segundo Simonovic (1992) e Fayaed *et al.* (2013), os modelos de gestão de albufeiras podem ser classificados em: i) modelos de simulação; ii) modelos de otimização; iii) modelos que combinam as funções anteriores.

Um modelo de simulação é utilizado para simular o funcionamento de uma albufeira, ou de um sistema de albufeiras, para um conjunto de condições definidas, ou seja, não procura uma solução ótima para a gestão do sistema. Um exemplo deste tipo de modelo foi criado por Silva (2015), utilizando o programa HEC-ResSim, para simular várias regras de exploração para situações de cheia, definidas para o sistema Aguieira-Raiva-Fronhas. O HEC-ResSim é o programa de simulação de albufeiras que está integrado no sistema de previsão hidrológica utilizado nos Estados Unidos da América, cuja descrição se apresenta em 2.6.1.3 (WMO, 2010a).

Por outro lado, os modelos de otimização procuram uma solução ótima para a gestão do sistema, permitindo criar regras de operação que otimizem o seu funcionamento. Por definição, estes modelos necessitam de uma função objetivo, variáveis de decisão e restrições. Os modelos de otimização podem-se classificar em modelos de: i) programação linear, ii) programação não linear, iii) programação dinâmica, e iv) inteligência computacional. A descrição dos vários modelos é apresentada nas revisões bibliográficas realizadas por Fayaed *et al.* (2013) e Ahmad *et al.* (2014).

A escolha dos modelos mais adequados a utilizar na gestão de albufeiras depende das características das mesmas e/ou da inter-relação entre elas – no caso de se tratar de um sistema de albufeiras – bem como do tipo de problemas a resolver (Fayaed *et al.*, 2013; Ahmad *et al.*, 2014).

Atualmente, no desenho de um sistema de gestão operacional de albufeiras, a prioridade é geralmente atribuída ao objetivo de proteção de pessoas e bens através do controlo de cheias, por contraponto a objetivos associados a usos benéficos tais como a geração de energia elétrica, a navegabilidade ou a proteção de ecossistemas (Yang *et al.*, 2012, Zhou *et al.*, 2014). O cumprimento deste objetivo de proteção assenta na adequada previsão da precipitação e de caudais. Embora já existam alguns estudos e aplicações da utilização dessas previsões na exploração das albufeiras (Faber e Stedinger, 2001; Zhao *et al.*, 2014), a avaliação dos benefícios económicos dessa utilização ainda é uma matéria pouco abordada (Bravo *et al.*, 2008; Ahmed e Mays, 2013; Silva, 2015).

Sobre a gestão operacional de albufeiras, múltiplos estudos foram já desenvolvidos, uns focando-se no objetivo de controlo de cheias (Wei e Hsu, 2008, Kumar *et al.*, 2010; Ahmed e Mays, 2013; Zhao *et al.*, 2014), outros na otimização multi-objetivo (Yazdi e Neyshabouri, 2012; Vieira *et al.*, 2010). Paralelamente, outros trabalhos desenvolvem os objetivos do adequado fornecimento de água (Chang

et al., 2013), de redução de emissões de carbono (Wu *et al.*, 2011), ou da proteção ecológica e garantia de navegabilidade (Yang *et al.*, 2012).

De acordo com Fayaed *et al.* (2013), a combinação de modelos de otimização com modelos de simulação é a solução que tem apresentado melhores resultados para a gestão de albufeiras.

2.6. SISTEMAS DE ALERTA DE CHEIAS

2.6.1. EXPERIÊNCIA A NÍVEL INTERNACIONAL EM SISTEMAS DE PREVISÃO E ALERTA DE CHEIAS

2.6.1.1. Desenvolvimentos no âmbito da Comissão Europeia

As cheias desastrosas nas bacias hidrográficas do rio Elba e do rio Danúbio, em agosto de 2002, chamaram a atenção da União Europeia para a necessidade de tratar a previsão de cheias não apenas ao nível regional e nacional, mas também a nível transfronteiriço, sendo necessários esforços para estabelecer pontes de comunicação entre as diferentes autoridades dos países com bacias hidrográficas comuns (Thielen *et al.*, 2009).

European Flood Alert / Awareness System (EFAS)

No contexto exposto, a Comissão Europeia (CE) promoveu um projeto de investigação de longa duração para a criação e implementação do Sistema Europeu de Alerta de Cheias (*European Flood Alert / Awareness System - EFAS*), que se iniciou em 2003, sendo desenvolvido pelo Centro Comum de Investigação (*Joint Research Centre - JRC*) em estreita colaboração com vários institutos nacionais ligados aos serviços hidrológicos e de meteorologia dos Estados Membros da União Europeia (Roo *et al.*, 2003; Thielen *et al.*, 2009; EFAS, 2015).

O EFAS é um sistema complementar a alguns sistemas nacionais e regionais existentes, que visa melhorar a prevenção das cheias fluviais nas bacias hidrográficas europeias transnacionais, proporcionando às autoridades nacionais e também à Comissão Europeia – através do *European Response and Coordination Centre (ERCC)* – informações probabilísticas sobre a previsão de cheias com 3 a 10 dias de antecedência (Ramos *et al.*, 2007, Thielen *et al.*, 2009; Pappenberger *et al.*, 2011b; Pappenberger *et al.*, 2015).

Em modo operacional – a funcionar desde outubro de 2012 – este sistema é executado duas vezes ao dia (às 00:00 e às 12:00 UTC), incorporando atualmente, em cada um desses instantes, várias previsões meteorológicas e dados observados obtidos em mais de 5000 estações meteorológicas e de 500 estações hidrológicas existentes por toda a Europa. As diferentes previsões meteorológicas, efetuadas essencialmente por dois centros de meteorologia europeus (*German Weather Service – DWD* e *European Center for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF*), são analisadas e combinadas através de um SPE (ver conceito em 2.2.3), produzindo um conjunto de previsões probabilísticas usadas como informação de base para um modelo hidrológico distribuído, designado LISFLOOD (descrito em 2.3.5), o qual foi concebido pelo JRC especificamente para simular os processos hidrológicos em grandes bacias hidrográficas. Os dados meteorológicos observados são

utilizados para gerar as condições iniciais do modelo (Ramos *et al.*, 2007, Thielen *et al.*, 2009; Pappenberger *et al.*, 2011; EFAS, 2015). O sistema, através do LISFLOOD, processa e combina automaticamente os vários dados sobre as condições do estado do tempo e os resultados do escoamento obtidos com esse modelo, e, no caso de ser detetada persistentemente uma probabilidade elevada de cheia para os próximos 3-10 dias, as instituições parceiras – das quais nenhuma é portuguesa – recebem as informações detalhadas emitidas pelo EFAS. O estado de alerta de cheia é disseminado na interface *web* do EFAS, sendo atualizado duas vezes por dia. Uma vez que o alerta de cheias é da responsabilidade dos Estados-Membros da União Europeia, o EFAS apenas disponibiliza ao público os alertas já arquivados (EFAS, 2015) (Figura 9).

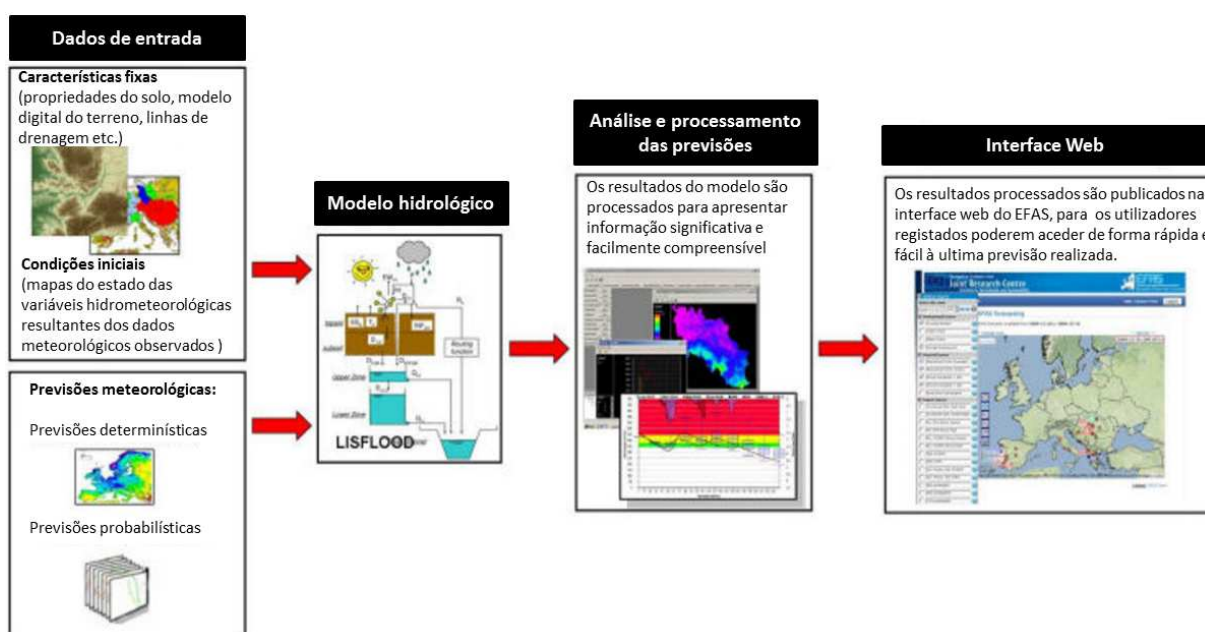


Figura 9. Representação esquemática do funcionamento geral do EFAS (adaptado de EFAS, 2015).

Os níveis de alerta do EFAS baseiam-se no tempo de retorno que está associado a um determinado caudal de cheia. Estes valores são definidos, para cada célula da área modelada pelo LISFLOOD – que tem uma resolução espacial de 5 km em toda a Europa (Seibert *et al.*, 2014) – através das séries de escoamento resultantes da simulação hidrológica efetuada com 20 anos de registos meteorológicos (EFAS, 2015) (Figura 10).

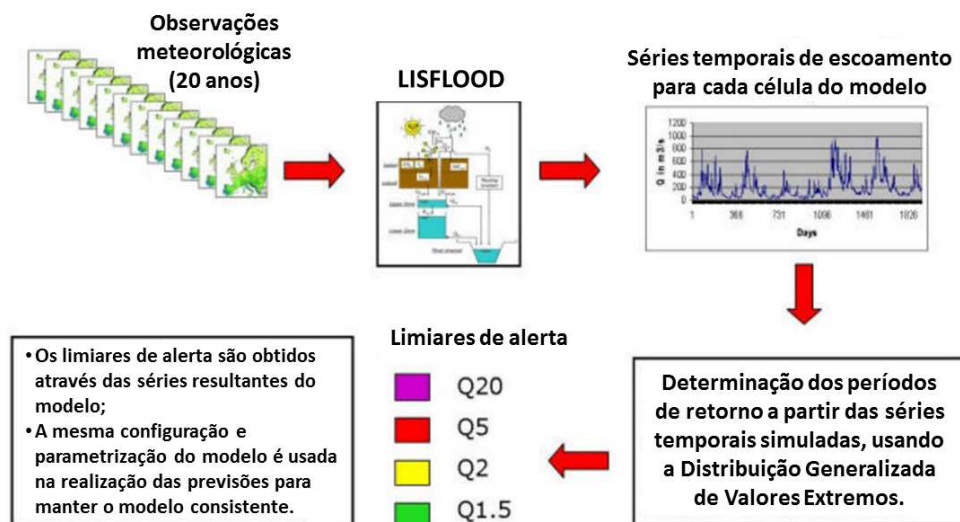


Figura 10. Esquema geral de definição dos níveis de alerta do EFAS (adaptado de EFAS, 2015).

Após a sua operacionalização, o investimento no EFAS tem-se focado fundamentalmente na melhoria da qualidade das previsões e dos alertas emitidos (Pappenberger *et al.*, 2015). Alfieri *et al.* (2014) concluíram que o sistema tem uma boa capacidade de prever cheias com 10 dias de antecedência, em bacias hidrográficas superiores a 300 km², mas que em bacias com áreas inferiores o desempenho do sistema diminui consideravelmente, devido em parte à subestimação do escoamento nas zonas de montanha. Pappenberger *et al.* (2015) referiram que o EFAS apresentou uma boa atuação na previsão de vários eventos de cheia recentes, incluindo as cheias ocorridas em 2014 na região dos Balcãs e, em 2013, na Europa Central, e mostraram que o benefício económico potencial da sua utilização pode ser substancial (benefícios da ordem de 400 euros, por cada 1 euro investido no sistema).

Entretanto, a capacidade do EFAS não se limita apenas à previsão de cheias. É uma ferramenta que pode ser usada em bacias grandes e transnacionais para uma variedade de outras aplicações, de que são exemplo a monitorização da situação hidrológica em toda a Europa, bem como a avaliação dos efeitos das medidas de regulação dos rios, das mudanças do uso do solo e das alterações climáticas (Thielen *et al.*, 2009). No entanto, devido à falta de dados para parametrização, calibração e validação do modelo hidrológico, o EFAS não ainda integra nenhuma componente de simulação de operações em albufeiras (Thielen *et al.*, 2009, Seibert *et al.*, 2014). A descrição detalhada do sistema é apresentada em Thielen *et al.* (2009) e Bartholmes *et al.* (2009).

Global Flood Awareness System (GloFAS)

O Sistema Global de Alerta de Cheias (*Global Flood Awareness System* - GloFAS) foi desenvolvido em conjunto pelo JRC e pelo ECMWF, para previsão de cheias à escala global, independente de fronteiras administrativas e políticas. A configuração deste sistema seguiu uma estrutura semelhante à do sistema EFAS, e integra o mesmo modelo hidrológico, embora com uma resolução espacial de cálculo menor, e por conseguinte, aplica-se apenas a grandes bacias hidrográficas. Relativamente aos dados de entrada, o GloFAS incorpora as previsões meteorológicas diárias do Sistema de Previsão por

Ensemble do ECMWF (ENS), com um alcance temporal de 15 dias, e, como dados climatológicos de referência, utiliza os dados ERA-Interim, que consiste numa base de dados em grelha – de $0,75^\circ$ (≈ 79 km) de resolução espacial –, com estimativas de variáveis meteorológicas para todo o globo, obtidas pela última reanálise do modelo atmosférico do ECMWF (Alfieri *et al.*, 2013; GLOFAS, 2015).

Atualmente, este sistema encontra-se num estado pré-operacional, produzindo previsões diárias de cheias desde junho de 2011, embora baseadas no modelo hidrológico ainda não calibrado (Fan, 2015). Na sua fase de testes, o GloFAS foi capaz de prever inundações com duas semanas de antecedência, tendo mostrado o seu potencial de previsão durante as cheias ocorridas em agosto de 2013, no Paquistão, e em setembro de 2013, no Sudão (GLOFAS, 2015). No entanto, a Comissão Europeia pretende continuar com a investigação e o desenvolvimento deste sistema, executando testes rigorosos e as adaptações necessárias para que o GloFAS seja um sistema operacional para decisores com competências na gestão das situações de cheia (GLOFAS, 2015). Entre os utilizadores dos resultados do GloFAS está, por exemplo, o *Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais* (Cemaden) do Brasil (Fan, 2015).

Projetos de Investigação (I&D)

No âmbito dos seus programas de investigação e inovação (Programas-Quadro de Investigação e Desenvolvimento), a CE tem promovido diversos outros projetos destinados a melhorar a previsão das cheias e a explorar a quantificação da incerteza que lhes está associada (Ashton *et al.*, 2003; CE, 2004; CE, 2015a,b). Demonstrando esse facto, Ashton *et al.* (2003) apresentam uma lista contendo 100 projetos de investigação relacionados com as cheias, levados a cabo desde 1984, com financiamento oriundo desses programas comunitários. Dessa lista, alguns focaram-se especificamente na melhoria da previsão de cheias, por exemplo através do desenvolvimento e aplicação de novas abordagens, de novos modelos hidrometeorológicos e de novas tecnologias para a deteção e para a gestão das situações de risco. Denota-se que, segundo os mesmos autores, em nenhum desses casos descritos houve participação portuguesa.

O *Achieving Technological Innovation in Flood Forecasting* (ACTIF) é um exemplo de um desses projetos de investigação que foi financiado pela CE no âmbito do 5º Programa-Quadro de I&D – vigente entre 1998 a 2002 – para recolher e disseminar os benefícios de vários outros projetos de investigação, desenvolvidos no âmbito do mesmo programa de financiamento, destinados a alargar o período de previsão e de alerta das cheias. Desta forma, o ACTIF tinha como objetivo facilitar a implementação das inovações tecnológicas desenvolvidas, nomeadamente as que permitem aos investigadores analisar e combinar dados de numerosas fontes: satélites, radares e bases de dados (ACTIF, 2015). No âmbito do ACTIF, Todini *et al.* (2005) realizaram um levantamento das melhores práticas para a avaliação e utilização da incerteza na previsão de cheias, referindo e descrevendo alguns sistemas operacionais de previsão de cheia existentes na Europa, tais como o sistema utilizado em Inglaterra e no País de Gales - *The Environment Agency for England and Wales*, entre outros. Dada a relevância e o investimento nos sistemas de previsão EFAS e GloFAS, no âmbito dos últimos programas comunitários, o investimento em outros projetos de investigação dedicados à previsão de

cheias, nomeadamente cheias fluviais, não tem tido uma expressão tão significativa como nos programas anteriores (CE, 2015a,b).

2.6.1.2. Outros desenvolvimentos na Europa

Na Holanda, o Deltares tem sido uma das entidades pioneiras no desenvolvimento de sistemas de previsão de cheias utilizando resultados de modelos numéricos de previsão meteorológica, tendo as correspondentes metodologias – agregadas na aplicação Delft-FEWS (*Deltares Flood Early Warning System*), desenvolvida e disponibilizada abertamente pela mesma instituição – sido aplicadas na elaboração de sistemas específicos para diferentes casos de estudo, em vários países em todo o mundo (Reggiani *et al.*, 2003; Reggiani e Verwey, 2005; Werner *et al.*, 2005; Cranston *et al.*, 2007; Weerts *et al.*, 2010; Gijssbers *et al.*, 2011; Werner *et al.*, 2013; Fan, 2015).

A aplicação Delft-FEWS consiste numa plataforma (ou infraestrutura) informática de processamento de dados, concebida inicialmente para a construção de sistemas operacionais de previsão hidrológica personalizados, adaptados às necessidades específicas de cada instituição utilizadora, sendo indicada para aplicação a grandes áreas – com escalas a nível regional e nacional (Deltares, 2010; Werner *et al.*, 2013; Deltares, 2015).

Genericamente, a aplicação Delft-FEWS reúne um conjunto de módulos que permitem importar e armazenar dados, transferir dados de um lugar para outro (por exemplo, de um interface do utilizador para um modelo hidrológico, ou de um modelo hidrológico para um modelo hidráulico, etc.) e executar algumas transformações em série temporais de dados. Desta forma, permite implementar um fluxo de trabalho mediante o qual se podem interconectar vários modelos preparados pelo utilizador para uma aplicação específica. Esta aplicação inclui também módulos de importação de dados de fontes exteriores, como dados meteorológicos *online* ou dados hidrológicos de bases de dados externas. Esses dados incluem, por exemplo, séries temporais de registos hidrometeorológicos obtidas a partir de sistemas de telemetria (precipitação, caudais, níveis de água, etc.), dados de radar e dados de previsão meteorológica, nomeadamente previsões por *ensemble*. Uma descrição mais detalhada da estrutura da aplicação Delft-FEWS é apresentada por Werner *et al.* (2013).

Devido à flexibilidade de importação de dados e de conexões de modelos, atualmente a aplicação Delft-FEWS está a ser utilizada também na criação de sistemas de gestão operacional diária, de monitorização em tempo real e de previsão e alerta relativos a outras disciplinas, como por exemplo, em sistemas de monitorização e previsão da qualidade da água ou em sistemas de gestão de reservatórios (Werner *et al.*, 2013; Deltares, 2015).

Ao nível europeu, foram desenvolvidos sistemas de previsão de cheias em vários países utilizando a aplicação Delft-FEWS, nomeadamente na Holanda, na Suíça, no Reino Unido (Escócia, Inglaterra e País de Gales) (Cortes *et al.*, 2013; Werner *et al.*, 2013) e em Espanha (Ibanez *et al.*, 2011).

Em Espanha, importa referir a existência do *Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH)*, que consiste num sistema de informação em tempo-real baseado na recolha, transmissão e

processamento dos dados das variáveis hidrometeorológicas e hidráulicas mais significativas, em determinados pontos da área de cada confederação hidrográfica. Este sistema permite a emissão de alertas de situações meteorológicas adversas (CHD, 2009; Ibanez *et al.*, 2011) e atualmente inclui um módulo de previsão de cheias a curto prazo (até 72 horas) (CHMS, 2014). O SAIH receciona informação relativa às bacias, aos rios e às infraestruturas hidráulicas, nomeadamente caudais e níveis de água nos rios e nas albufeiras e dados meteorológicos básicos (precipitação, temperatura, altura de neve, etc) e transmite-os ao centro de gestão operacional das bacias da respetiva confederação hidrográfica. Esta informação – complementada com previsões meteorológicas obtidas através do modelo regional HIRLAM (*High Resolution Limited Area Model*) pela Agência Estatal de Meteorologia (AEMet) – é usada para a gestão da água, tanto em situações normais (exploração de sistemas) como em situações de emergência (secas e cheias). Através do conhecimento dessa informação, o SAIH permite identificar e prever a ocorrência de cheias e possibilita o acompanhamento da sua evolução. A conjugação dos dados captados com o uso de modelos de previsão adaptados a cada bacia – interconectados através da aplicação *Delft-FEWS* que está instalada no sistema – permite fazer previsões e análises da sua evolução futura. Os modelos hidrológicos e hidráulicos utilizados para previsão dependem de cada confederação hidrográfica, mas em nenhum dos casos está ainda implementado um modelo de gestão de albufeiras. Incluídas na rede de monitorização no SAIH, existe um grupo de estações, designado por REBASA (“*Red básica de seguimiento de avenidas*”) que fornecem os dados de base do sistema de apoio à decisão em matéria de inundações (Ibanez *et al.*, 2011; CHMS, 2014).

No resto da Europa, embora existam muitos sistemas de previsão e/ou alerta de cheias, com diferentes componentes e características, continuam a surgir estudos nesta matéria, em resultado da necessidade de melhorar as previsões de ocorrência desses eventos. Todini *et al.* (2005) e Cloke e Pappenberger (2009) identificaram alguns desses sistemas e descreveram aplicações a diferentes casos, referenciando algumas das suas principais características, como por exemplo os modelos hidrológicos subjacentes e os dados meteorológicos que utilizam na previsão. Como já referido em 2.3.7, Pappenberger *et al.* (2013) apresentaram uma compilação de sistemas operacionais de previsão hidrológica e de cheias existentes a nível mundial, onde se podem identificar os principais sistemas desenvolvidos na Europa.

2.6.1.3. Experiência dos Estados Unidos da América

Nos Estados Unidos da América (EUA), o NOAA’s *National Weather Service* (NWS) é o organismo responsável, a nível nacional, pela realização e emissão das previsões do escoamento nos principais rios e pela emissão de alertas de cheias. Estas previsões são realizadas em 13 centros regionais de previsão existentes no país, denominados *River Forecast Centers* (RFC), cada um associado a um dos grandes sistemas fluviais nacionais (NOAA-NWS, 2000; Roe *et al.*, 2010; NOAA-NWS, 2015).

Nos anos 70, o NWS desenvolveu um sistema de previsão hidrológica, designado *National Weather Service River Forecast System* (NWSRFS), que foi utilizado desde então em estudos e previsões hidrológicas oficiais dos EUA e também em outros países, como por exemplo: na China, no Panamá, na Nicarágua, no El Salvador, na China e na África do Sul (NOAA-NWS, 2000; Roe *et al.*, 2010;

WMO, 2010a). Este sistema consistia num conjunto de procedimentos informáticos inter-relacionados, que executavam uma grande variedade de operações de gestão de dados e de funções (ou modelos) hidrológicas e hidráulicas, permitindo a realização de previsões, a curto prazo, de caudais fluviais em situação normal e de cheia, bem como o estabelecimento de cenários probabilísticos do escoamento fluvial, a longo prazo, para apoio na gestão do abastecimento de água e na mitigação de inundações (Perica et al., 1999, NOAA-NWS, 2000).

Com os avanços na ciência e na tecnologia, o NWS considerou que necessitava de uma infraestrutura flexível de simulação hidrológica que pudesse beneficiar de modelos e conceitos operacionais mais recentes, desenvolvidos nos EUA e no resto do mundo. Nessa perspetiva, iniciou o desenvolvimento e a implementação faseada (por grupos de RFC) do *Community Hydrologic Prediction System* (CHPS), sistema – desenvolvido com a colaboração do Deltares – que veio substituir o NWSRFS (Roe et al., 2010), estando neste momento operacional em todos os RFC (Demargne et al., 2014; Deltares, 2015; NOAA-NWS, 2015).

O CHPS utiliza a aplicação Delft-FEWS (descrita anteriormente em 2.6.1.2) como infraestrutura de base e integra os modelos hidrológicos e hidráulicos do NWS (migrados do NWSRFS) e do USACE, nomeadamente o HEC-ResSim para simulação de operações em albufeiras e o HEC-RAS para a simulação do escoamento superficial (Roe et al., 2010; WMO, 2010a; Deltares, 2015 NOAA-NWS, 2015). Incorpora ainda produtos de previsão por *ensemble*, de curto e longo prazo, realizados pelo *Hydrologic Ensemble Forecast Service* (HEFS) (Demargne et al., 2014).

2.6.2. EXPERIÊNCIA NACIONAL: SISTEMA DE VIGILÂNCIA E ALERTA DE RECURSOS HÍDRICOS (SVARH)

Em Portugal, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), como Autoridade Nacional da Água, é o agente de Proteção Civil responsável pela coordenação da gestão da água e, dentro desta, a gestão de cheias (SNIRH, 2004; Decreto-Lei n.º56/2012 de 12 de março). Neste âmbito, a APA possui o Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH) que permite conhecer em tempo-útil o estado hidrológico dos rios e albufeiras do país (níveis de água, caudais e volumes armazenados) e alguma informação meteorológica, baseada numa rede de estações de medição com transmissão automática (Rodrigues et al., 2003; APA, 2015).

O Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH) integra estações automáticas com teletransmissão pertencentes às redes meteorológica, hidrométrica, udométrica e de qualidade da água e também a automatização das albufeiras, tanto nacionais como espanholas (Rodrigues et al., 2003; APA, 2015). A inclusão da informação em tempo real da exploração das albufeiras nacionais foi possível através de um acordo entre a APA e o Grupo EDP (Rodrigues et al., 1998). Os dados das albufeiras espanholas são obtidos através do protocolo de troca de informações de cheias no âmbito da Convenção Luso-Espanhola (Rodrigues et al., 2003a).

O SVARH permite assim conhecer em tempo-útil o estado hidrológico dos rios e albufeiras do país e ainda informação meteorológica relevante, possibilitando a antevisão da sua possível evolução. Funcionalmente, está organizado em três módulos (INAG, 2001b; Rodrigues et al., 2003b; APA, 2015):

- i. Aquisição de dados, constituída por uma rede de estações de medição com transmissão automática;
- ii. Processamento central, realizado por um sistema informático que interroga as estações em intervalos regulares e armazena os dados numa base de dados central, utilizada por ferramentas de gestão e análise de dados acopladas, nomeadamente modelos de simulação hidrológicos e hidráulicos;
- iii. Disponibilização de dados, efetuada através de um *software* (aplicação RIOS) que permite, via internet, aceder aos dados do SVARH e visualizar de uma forma intuitiva a informação atual e as previsões obtidas pelos modelos de simulação, organizadas por bacias hidrográficas ou distritos.

Na Figura 11 apresenta-se um esquema que resume o funcionamento geral do SVARH, com as principais funções e características dos seus três módulos, e a sua interligação.

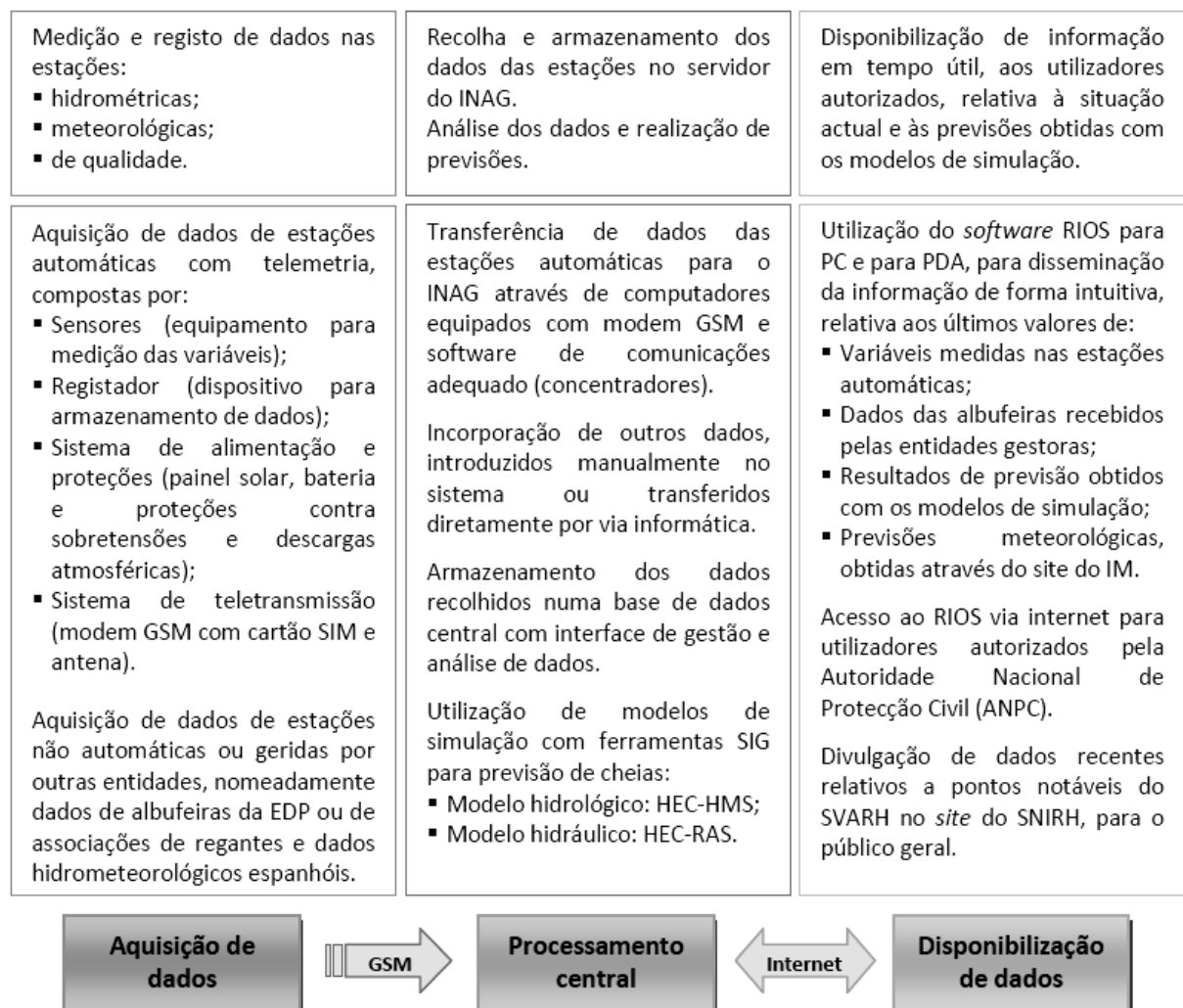


Figura 11. Esquema resumo de funcionamento do SVARH.

A transferência dos dados das estações para o servidor do SVARH é feita automaticamente por computadores equipados com *modems* GSM e um software de comunicações adequado. Estas aplicações permitem escolher o período de interrogação das estações, e podem aumentar a frequência das chamadas se um ou mais valores atingirem valores de alarme (INAG, 2001b). Conforme referido por Rodrigues *et al.* (2003b), numa situação normal a frequência de transmissão dos dados de qualquer tipo de estação é horária, podendo essa frequência ser aumentada até 5 minutos, dependendo da situação de risco.

Além das estações automáticas referidas, o SVARH recebe dados de outras fontes, introduzidos manualmente no sistema ou transferidos diretamente por via informática. Os dados de introdução manual são provenientes geralmente de estações não automatizadas, podendo referir-se como exemplo os dados enviados para o SNIRH, por fax ou telefone, pelas albufeiras geridas por associações de regantes. A APA tem também protocolos estabelecidos com outras entidades para transferência de dados por via informática, como acontece por exemplo com os dados das albufeiras da EDP (INAG, 2001b).

No âmbito das ações do SVARH, em situação de risco de cheia a APA utiliza dois modelos de simulação para prever a evolução da situação: um modelo de simulação hidrológica (HEC-HMS) que possibilita a previsão de cheias a partir de dados de previsão de precipitação e do conhecimento do estado de humidade dos solos (Figura 12); e um modelo de simulação hidráulica (HEC-RAS) que permite a previsão das áreas inundadas a partir da propagação de uma onda de cheia (gerada pela precipitação ou pela manobra de comportas em barragens). Estes modelos são apoiados em Sistemas de Informação Geográfica, que fornecem informação complementar de base, nomeadamente relativa às características fisiográficas das bacias hidrográficas do sistema (INAG, 2001b). Prioritariamente, as previsões de cheias são realizadas para pontos críticos, como sejam: locais a montante de albufeiras (caudal), núcleos urbanos (cotas) e estações hidrométricas da rede de vigilância (caudal e cota) (SNIRH, 2004; Brandão, 2008).

O SVARH não contém ainda modelos numéricos preparados para a modelação hidrológica de todas as bacias hidrográficas portuguesas, mas apenas para algumas bacias com aflúências a albufeiras importantes e/ou a grandes rios.

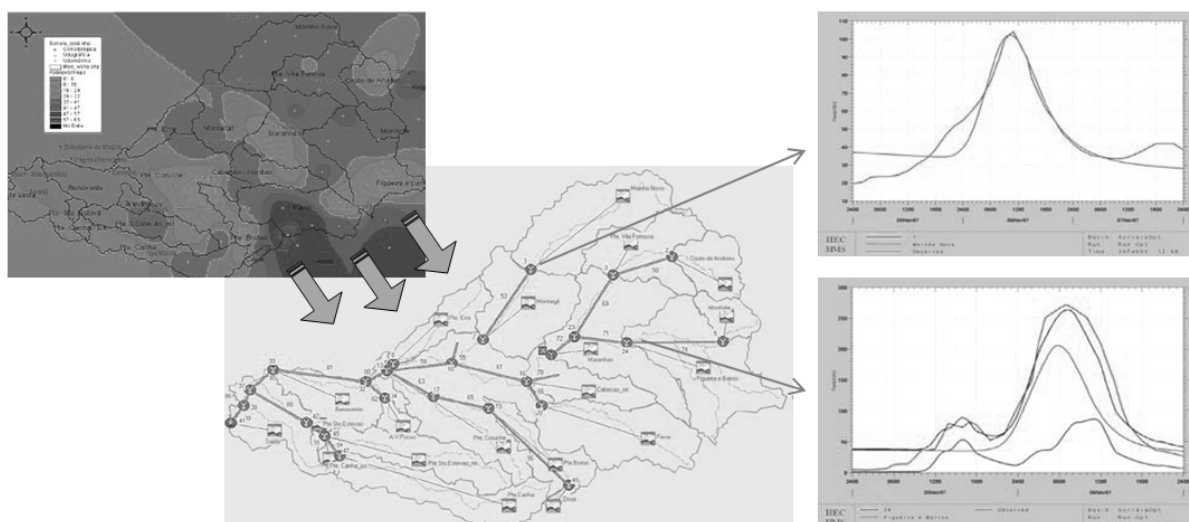


Figura 12. Esquema ilustrativo da modelação hidrológica de uma bacia hidrográfica efetuada no âmbito do SVARH (SNIRH, 2004).

A informação relativa a pontos notáveis do SVARH, tais como as fronteiras de rios internacionais e núcleos urbanos mais vulneráveis, de que é exemplo a cidade de Águeda, é também disseminada para o público em geral através do *site* do SNIRH. Dessa informação constam dados recentes de postos udométricos, hidrométricos, dados de albufeiras e de qualidade da água (SNIRH, 2004).

Em tempo diferido, os dados do SVARH são analisados por algoritmos inteligentes de controlo de qualidade e, após uma filtragem manual, são exportados para a base de dados do SNIRH, onde são disponibilizados para o público em geral através do seu *site* na internet (INAG, 2001b). No mesmo local são disponibilizados mapas de zonas inundáveis (SNIRH, 2004).

Como conclusão, salienta-se que o SVARH é, por definição, um sistema de monitorização e alerta de recursos hídricos, e como tal, relativamente à previsão de cheias, a sua aplicação está circunscrita à previsão a curto prazo (algumas horas) de eventos muito determinados (eventos esperados em locais específicos, abrangidos pela monitorização efetuada pelo sistema) baseada nos dados hidrometeorológicos em tempo-real. Deste modo, salienta-se que este sistema carece ainda de ser potenciado, quer na sua adaptação a todo o território nacional, aumentando o número de pontos de monitorização e vigilância, quer no eventual desenvolvimento de uma componente “permanente” de previsão a curto e a médio prazo de fenómenos hidrometeorológicos extremos, nomeadamente de cheias.

As necessidades de desenvolvimento do SVARH foram avaliadas também nos Planos de Gestão dos Riscos de Inundação (PGRI's) (APA, 2015), dando origem a propostas de reestruturação desse sistema – consideradas essenciais à proteção da população exposta às inundações – cuja execução será da responsabilidade da APA. As intervenções propostas foram organizadas segundo os quatro tipos de medidas seguintes (APA, 2015):

- i) implementação e validação de modelos de previsão hidrológica e hidráulicos, que permitam obter, em tempo-real, previsões, para as próximas horas ou dias, de caudais e níveis de água ao

longo das linhas de água, e particularmente nas zonas críticas de inundação identificadas nos PGRI's;

- ii) desenvolvimento ou reforço do sistema de alerta nas zonas críticas de inundação, através da instalação de estações hidrométricas e udográficas com capacidade de teletransmissão e/ou modernização de estações existentes;
- iii) inclusão no sistema de avisos dos elementos expostos (hospitais, escolas, indústrias, bombeiros, entre outros) em cada zona crítica de inundação, de forma a melhorar a informação disponibilizada aos agentes de proteção civil;
- iv) atualização do sistema de aviso no SNIRH, com a inclusão de informação atual relativa às estações hidrometeorológicas do sistema de vigilância que têm níveis de alarme definidos, para acesso público.

2.7. SÍNTESE E COMENTÁRIOS GERAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um sistema de alerta de cheias tem como função a emissão de mensagens de alerta destinadas ao acionamento de medidas para minimizar as consequências decorrentes das cheias. Para cumprir essa função, deve integrar várias funções de base, sendo de destacar o acompanhamento da evolução das condições hidrometeorológicas ao longo do tempo e a previsão das condições futuras. Neste sentido, várias instituições internacionais têm trabalhado no desenvolvimento de sistemas de monitorização, previsão e alerta de cheias, baseados em modelos integrados, que englobam uma componente meteorológica e uma hidrológica.

Na previsão de cheias, há dois fatores importantes ter em conta: o tempo de antevisão de uma situação de cheia e a fiabilidade da previsão emitida. A componente meteorológica revela-se aqui um ponto-chave, devido às incertezas existentes nos dados de previsão meteorológica. Estes dados são em geral obtidos através de modelos numéricos de previsão, ou seja, são dados calculados, que apresentam as limitações inerentes aos processos numéricos e às incertezas associadas ao conhecimento do estado na atmosfera num dado instante. Neste sentido, recentemente têm-se utilizado dados meteorológicos obtidos por radares e por observações de satélite (dados observados), complementando e/ou substituindo as observações dos postos meteorológicos. De forma idêntica, com vista a alargar os períodos de previsão, tem-se tornado frequente o recurso a uma abordagem probabilística, utilizando-se Sistemas de Previsão por *Ensemble* (SPE). Outro fator que por vezes pode ser condicionante dos resultados de previsão meteorológica é a resolução espacial de processamento dos modelos numéricos, que em alguns casos pode não ser compatível com a escala dos processos hidrológicos que ocorrem nas bacias hidrográficas. Para transformar a informação gerada pelos modelos de larga escala (ou modelos globais de circulação atmosférica) para as escalas menores, utilizam-se correntemente as técnicas de *downscaling*. No entanto, para pequenas parcelas do território, estas técnicas ainda requerem algum aprofundamento da investigação a nível mundial, de modo a aumentar o grau de fiabilidade das previsões emitidas.

Relativamente à componente hidrológica, existe uma enorme quantidade de modelos matemáticos e programas informáticos para simulação dos processos que estão na origem do escoamento e que permitem estimar o hidrograma resultante de uma dada situação meteorológica. Grande parte desses modelos apenas é aplicável com escalas temporais de análise diárias e mensais, mas ainda assim existem muitos modelos apropriados para simular processos hidrológicos a uma escala inferior, que, dependendo dos dados de entrada, poderá ser horária e em alguns casos poderá até ser efetuada ao minuto.

Quanto aos programas de simulação hidrológica, tradicionalmente apenas eram adequados à modelação dos processos hidrológicos em regime natural, mas programas mais recentes já são aplicáveis também a bacias reguladas, permitindo considerar operações em albufeiras. Alguns desses programas integram um módulo SIG e modelos matemáticos apropriados que permitem a realização da modelação hidrológica da área de análise de uma forma espacialmente distribuída.

A previsão de cheias fluviais depende assim da disponibilidade de previsões fiáveis de precipitação e da utilização de um modelo de simulação hidrológica que permita prever o escoamento correspondente. Contudo, para essas previsões serem consistentes, o modelo deve estar devidamente calibrado. Quando se pretende utilizar esse modelo sistematicamente na previsão operacional do escoamento fluvial, o processo de calibração deve ter em consideração a variação dos parâmetros de simulação ao longo do tempo, para atender à variação das condições hidrometeorológicas da bacia.

Nas bacias hidrográficas regularizadas, a gestão eficaz das albufeiras poderá ter um grande contributo na minimização dos impactos das cheias a jusante. Nesta perspetiva, um modelo de gestão de albufeiras é considerado uma peça-chave num sistema de previsão e de apoio à decisão em situações de cheia, pois permite avaliar várias alternativas de gestão e determinar qual a estratégia mais eficaz.

Internacionalmente, existem muitos sistemas de previsão e alerta de cheias, com diferentes características e adequados a diferentes situações. Muitos desses sistemas já integram previsões meteorológicas *por ensemble* para a realização das previsões hidrológicas, mas ainda poucos sistemas contêm uma componente de simulação ou gestão de albufeiras, como é o caso, por exemplo, dos sistemas EFAS e do GloFAS, promovidos pela CE. Com a criação do Delft-FEWS que, – funcionando como uma infraestrutura informática aberta, se adequa à criação de sistemas de previsão para diferentes locais e instituições – muitos dos sistemas desenvolvidos e/ou a desenvolver a nível internacional tendem para a uniformidade de características, nomeadamente da sua configuração estrutural. Exemplo disso é a utilização efetiva que o Delft-FEWS tem tido no desenvolvimento de sistemas de previsão e alerta de cheias em diversos países em todo o mundo, nomeadamente em vários países europeus e nos EUA.

Ao nível nacional, o SVARH é o sistema que permite conhecer praticamente em tempo-real o estado hidrológico dos rios e albufeiras do país, bem como alguma informação meteorológica relevante para monitorização de situações de cheia, sendo baseado numa rede de estações de medição com transmissão automática. No entanto, no âmbito das cheias, este sistema ainda não integra ainda nenhuma componente de previsão operacional a médio prazo, pois apesar de possuir modelos hidrológicos preparados para diversas bacias nacionais, a sua utilização está circunscrita à previsão de eventos muito determinados (eventos esperados em locais específicos, abrangidos pela monitorização

efetuada pelo sistema) realizadas essencialmente com base em dados hidrometeorológicos em tempo-real. Este sistema carece, assim, de progressos nesse sentido, e na correspondente adaptação a todo o território nacional. Além disso, e como preconizado nos PGRI's, este sistema necessita de várias intervenções consideradas essenciais à proteção da população exposta às inundações, particularmente através do desenvolvimento de uma componente operacional de previsão de cheias a curto e a médio prazo e do aumento do número e da operacionalidade de estações de monitorização com teletransmissão, entre outras intervenções propostas. No âmbito das inundações fluviais, o SVARH poderia ainda beneficiar também da integração de um modelo de gestão de albufeiras.

Por fim, salienta-se que, apesar de existirem muitos estudos realizados sobre a questão da previsão de cheias e de existirem já alguns sistemas de previsão em funcionamento, muitos estudos continuam ainda a ser feitos no sentido de melhorar a fiabilidade das previsões e aumentar o período de previsão, assim como o de integrar as previsões em sistemas de alerta e resposta de cheias, nomeadamente na gestão operacional de albufeiras com função de controlo de cheias.

3

METODOLOGIA

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo descreve-se a metodologia desenvolvida nesta tese para previsão e alerta de cheias em bacias hidrográficas regularizadas, que consiste na especificação dos procedimentos realizados para atingir os objetivos inicialmente definidos.

A metodologia geral adotada divide-se em 5 principais atividades, conduzidas de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 13.



Figura 13. Fluxograma da metodologia geral adotada nesta tese.

Primeiro, deverá proceder-se à construção do modelo de previsão hidrológica (ou simplesmente modelo hidrológico) adaptado às características da bacia hidrográfica que se pretende estudar, onde se incluem a preparação, a calibração e a verificação do funcionamento desse modelo. Em paralelo, deverão ser selecionados e recolhidos os dados de previsão de precipitação para essa região, a utilizar na previsão hidrológica, e deverá ser efetuado o processamento desses dados para o formato de entrada no modelo hidrológico.

Executando o modelo de previsão hidrológica da bacia com os dados de previsão de precipitação, obter-se-ão as previsões dos caudais afluentes, em regime natural, às várias secções de escoamento definidas nesse modelo. A atividade de simulação e previsão hidrológica consiste assim em executar o modelo de previsão de forma retrospectiva para um período do passado, definido em função dos dados de base existentes para a previsão hidrológica e para a avaliação dos resultados, a realizar na atividade seguinte, a qual consiste na análise e verificação dos resultados das simulações realizadas.

Por fim, tendo em conta as previsões dos caudais afluentes às secções críticas no controlo de cheias na bacia – nomeadamente albufeiras com capacidade de amortecer cheias e locais sensíveis à afetação pelas cheias, como núcleos urbanos, instalações industriais, etc. – deverá ser construído um modelo de apoio à decisão para otimizar a gestão operacional dos volumes armazenados nas albufeiras existentes na bacia, de modo a: i) minimizar os impactos a jusante, quando ocorrer uma cheia, e ii) não condicionar as restantes funções dos aproveitamentos, quando não houver previsão de ocorrência desses eventos.

Nas secções seguintes deste capítulo são descritos os dados de base e os métodos adotados para realizar cada uma das cinco principais atividades aqui consideradas. Nos capítulos 5 e 6 descreve-se a aplicação desta metodologia ao caso real da bacia hidrográfica do rio Mondego, que foi o caso de estudo utilizado como base para o desenvolvimento da mesma.

3.2. PREPARAÇÃO, CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO HIDROLÓGICA

3.2.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO HIDROLÓGICA

Esta atividade foca-se na construção de um modelo que permita conhecer – em situações de cheia ou de possibilidade de ocorrência desses eventos – os valores dos caudais nas principais linhas de água da bacia em análise (*output*), através do conhecimento dos valores da precipitação ocorrida na bacia (*input*) e das características hidrogeomorfológicas da mesma (*inputs* e parâmetros de calibração).

Para a construção do modelo de previsão hidrológica, foi utilizado o programa de simulação hidrológica HEC-HMS, descrito no capítulo de revisão bibliográfica (ver 2.4.5). Esta escolha baseou-se nos seguintes motivos:

- É um programa flexível, no sentido em que engloba vários modelos hidrológicos, permitindo dessa forma escolher os mais adequados às características da bacia em estudo;
- Permite simular os processos de precipitação-escoamento com um reduzido passo temporal (inferior a horário);

- Permite a simulação espacialmente distribuída com dados georreferenciados;
- Está disponível livremente para utilização, sem custos;
- É um programa amplamente utilizado a nível nacional e internacional, com resultados reconhecidos;
- Por último, mas não menos importante, é já um programa conhecido e utilizado pelas entidades portuguesas com interesse e responsabilidades nesta matéria – EDP e APA.

Para construir um modelo de previsão hidrológica (também designado por projeto) no HEC-HMS é necessário definir, à partida, os seguintes modelos:

- Modelo de bacia – estrutura geral da bacia utilizada para descrever as propriedades físicas da bacia e a topologia da rede hidrográfica; representada por símbolos que representam os elementos hidrológicos da bacia (sub-bacias, troços fluviais e reservatórios) e as conexões entre esses elementos (confluências, desvios, entradas e saída do modelo);
- Modelo hidromorfológico – modelo onde é realizada a caracterização geomorfológica e fisiográfica das sub-bacias e dos processos hidrológicos que nelas ocorrem (infiltração, retenção, evaporação, escoamento na superfície do terreno, armazenamento, escoamento de base e escoamento nas linhas de água);
- Modelo meteorológico – modelo de distribuição temporal e espacial da precipitação.

O modelo de previsão hidrológica é assim constituído genericamente por um conjunto de modelos interconectados que, de forma organizada, permitem simular os principais processos hidrológicos geradores das cheias fluviais ocorridas na bacia de estudo.

Primeiro, com base no Modelo Digital do Terreno (MDT) e nas características fisiográficas da bacia de estudo, constrói-se o modelo de bacia, definindo os elementos hidrológicos a considerar, nomeadamente as sub-bacias e os troços fluviais. Para tal, utiliza-se a aplicação HEC-GeoHMS, que extrai a informação do processamento do terreno efetuado com a aplicação ArcHydro Tools, no ArcMap. Além das características espaciais (áreas, elevação, declives, ligações, etc.) extraídas para o modelo de bacia, o HEC-GeoHMS permite extrair também para o modelo hidrológico outro tipo de informação armazenada em formato SIG (raster ou vectorial), nomeadamente valores de parâmetros hidrogeomorfológicos (impermeabilização do terreno, taxas de infiltração, cobertura do solo, etc.) (Figura 14).

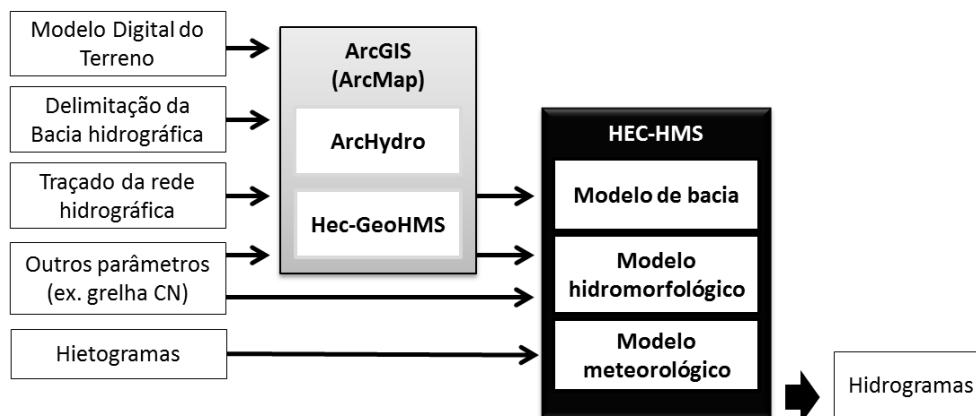


Figura 14. Esquema geral do procedimento utilizado para construção do modelo de previsão hidrológica no HEC-HMS (dados de base, aplicações informáticas auxiliares para o processamento dos dados de base, componentes e resultados do modelo).

Depois, através do conhecimento das características hidrológicas da bacia, constrói-se o modelo hidromorfológico, escolhendo-se os métodos mais apropriados para simular os principais processos hidrológicos que contribuem para a quantificação e previsão dos caudais de cheia.

Os métodos de simulação podem ser classificados em dois tipos: métodos de simulação de eventos e métodos de simulação contínua. Através da seleção dos métodos correspondentes, o HEC-HMS permite realizar simulações dos dois tipos (Feldman, 2000; Cunderlik e Simonovic, 2004; Chu e Steinman, 2009; Fleming, 2010; Datorani *et al.* 2011). Neste estudo, foram considerados apenas métodos de simulação de eventos, por falta de dados necessários para caracterizar o processo do escoamento subterrâneo e o seu impacto na geração do escoamento fluvial, os quais são requeridos pelos métodos de simulação contínua. Consideraram-se assim os seguintes métodos:

- Método do número de escoamento do SCS – para calcular o volume total de escoamento gerado através da precipitação;
- Método do Hidrograma Unitário do SCS – para simular o escoamento direto, ou seja, o escoamento subsuperficial e o escoamento à superfície do terreno;
- Método de Recessão – para simular a drenagem subterrânea lenta existente das massas de água subterrâneas para as linhas de água);
- Método de Muskingum-Cunge – para simular o escoamento ao longo das linhas de água.

A descrição dos métodos selecionados é apresentada no Anexo 1.

Cada um dos métodos de simulação é caracterizado através de parâmetros específicos – doravante designados como parâmetros de simulação. Alguns desses parâmetros podem ser obtidos através da observação e/ou medição de características das bacias hidrográficas e das linhas de água. Os outros podem ser estimados por um processo de calibração (ver secção seguinte - 3.2.2) ou, se a sua variação tiver uma contribuição marginal para a simulação do escoamento fluvial, podem ser adotados valores da literatura existente. No Quadro 8, apresentam-se os parâmetros requeridos por cada um dos métodos de simulação adotados, bem como os critérios adotados no estudo desenvolvido para estimação dos mesmos.

Quadro 8. Métodos selecionados para simular os principais processos hidrológicos que contribuem para a quantificação e previsão dos caudais de cheia, parâmetros requeridos e critérios de estimação adotados (Mendes e Maia, 2015a e 2015b).

Componente hidrológica	Método de simulação selecionados	Parâmetros de simulação	Critério/ processo para estimação dos parâmetros
Volume total de escoamento (precipitação efetiva)	Método do número de escoamento do SCS	Retenção inicial (mm)	Considerado nulo
		Número do Escoamento do SCS	Processo de calibração
		Área impermeável (%)	Considerado nulo
Escoamento direto	Hidrograma Unitário do SCS	Tempo de resposta (min)	Baseado nas características das sub-bacias
Escoamento de base	Método de Recessão	Caudal inicial ($\text{m}^3\text{s}^{-1}/\text{km}^2$)	Registos de caudais
		Constante de recessão	Processo de calibração
		Relação ao pico	Análise de sensibilidade
Escoamento fluvial	Método de Muskingum-Cunge	Comprimento da linha de água	Baseado nas características das linhas de água
		Inclinação do talvegue	
		Forma da secção do escoamento (largura do canal e inclinação das margens)	
		Coeficiente de Manning	Valores da literatura (Lencastre e Franco, 2010)

Por seu turno, a construção do modelo meteorológico consiste na definição das variáveis meteorológicas (dados de entrada do modelo de previsão hidrológica) – precipitação, evapotranspiração e degelo – a considerar na simulação hidrológica, bem como dos métodos de introdução de cada uma dessas variáveis.

Neste estudo, o modelo meteorológico incluiu apenas a precipitação como variável meteorológica, definida através de hietogramas específicos para cada sub-bacia definida no modelo de bacia. Os processos de evaporação e de evapotranspiração não foram incluídos no modelo porque se considerou que têm um efeito desprezável para a previsão de caudais de cheia. Relativamente ao degelo, apesar de ser uma variável que pode ter um contributo considerável para a ocorrência de cheias em algumas regiões, não foi incluído no modelo de previsão hidrológica porque se considerou que em Portugal o seu efeito é diminuto, além de que seria difícil simular a correspondente contribuição com os métodos e os dados disponíveis.

Por último, antes de executar o modelo hidrológico é necessário definir ainda o período da simulação ou período de previsão – estabelecido através da data e hora de início e de fim desse período – e o passo temporal de cálculo. Tendo em conta os objetivos da presente tese e as características das previsões de precipitação a utilizar como dados de entrada do modelo hidrológico (descritas na secção em 3.3), considerou-se: i) um período de simulação de 10 dias, iniciado às 00h de cada dia em que se pretende efetuar uma previsão, e ii) um passo temporal de cálculo de 3 horas.

3.2.2 CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO HIDROLÓGICA

3.2.2.1. Parâmetros de calibração

Após uma análise de sensibilidade preliminar realizada para testar o funcionamento do modelo hidrológico – realizada através da execução de várias simulações utilizando os métodos indicados na secção anterior com diferentes valores dos parâmetros de simulação (ver 5.2.1.2.) – concluiu-se que os parâmetros que não podem ser obtidos por medição das características físicas da bacia e cujas variações têm um impacto significativo sobre os resultados das simulações são (Quadro 8): i) o número de escoamento (CN) para o cálculo do volume total de escoamento e, (ii) a constante de recessão (R), para o cálculo do escoamento base. Portanto, estes foram considerados os parâmetros de calibração (Mendes e Maia, 2015a e 2015b).

O parâmetro CN varia de acordo com as características da superfície do terreno, particularmente com as condições existentes de humidade do solo. Este parâmetro está relacionado com as perdas de água que ocorrem no processo de geração de escoamento resultante da precipitação. Os menores valores de CN correspondem a situações em que ocorrem mais perdas nesse processo, isto é, quando os solos estão pouco saturados. Nestas situações, o solo retém mais água e gera-se menos escoamento direto. Por outro lado, os valores mais elevados de CN correspondem a situações opostas, em que ocorrem menos perdas e em que é gerado mais escoamento direto – situações que estão associadas a um grau mais elevado de saturação do solo e uma menor capacidade de infiltração de água.

A bibliografia tomada como referência (Feldman, 2000; Lencastre e Franco, 2010; Hipólito e Vaz, 2011) indica que os valores de CN podem variar desde cerca de 30, em solos com elevada permeabilidade e elevadas taxas de infiltração, até 100, em superfícies impermeáveis ou em massas de água. Com base nessa informação, nas características gerais das bacias hidrográficas portuguesas e na análise de sensibilidade realizada, especificou-se neste estudo que o parâmetro CN deve variar apenas entre 30 e 80, dependendo: i) das condições hidrológicas anteriores, refletindo o estado atual da humidade do solo, e ii) das previsões de precipitação para os dias seguintes. Deste modo, estabeleceu-se que o valor de CN deve variar ao longo do tempo de acordo com: i) o volume total do escoamento nos 5 dias antes da data de simulação (RV_{-5}) e com ii) a quantidade total de precipitação nos 3 dias subsequentes (TP_{+3}). De modo a simplificar o processo de calibração deste parâmetro, que é complexo, dada a não linearidade dos processos hidrológicos envolvidos, não se considerou uma variação contínua deste parâmetro, mas apenas variações discretas numa escala de dez, isto é, $CN = 30, 40, 50, 60, 70$ ou 80 .

A constante de recessão, R, corresponde à taxa de decaimento exponencial do escoamento de base, que representa a forma como o escoamento de base diminui entre eventos de precipitação, a qual varia ao longo do tempo, dependendo do valor da última recarga de água subterrânea e do período em que a mesma ocorreu. Teoricamente, este parâmetro pode variar entre 0 e 1: os valores mais baixos correspondem a um decaimento mais rápido do escoamento de base, enquanto os valores mais próximos de 1 correspondem à situação inversa. Com base na bibliografia de referência (Feldman, 2000) e na análise de sensibilidade efetuada para aos parâmetros de simulação, neste estudo estabeleceu-se que o parâmetro R assume valores de 0,7 ou de 0,9, dependendo da quantidade total de

precipitação que ocorreu nos dois meses anteriores à data de simulação (TP_{-60}), refletindo dessa forma a recarga de água subterrânea correspondente (Mendes e Maia, 2015a e 2015b).

3.2.2.2. Processo de calibração

Atendendo aos objetivos inicialmente definidos para esta tese, o modelo de previsão hidrológica destina-se a ser utilizado de forma contínua (por exemplo, diariamente) para previsão de caudais numa determinada bacia de estudo no período de 10 dias seguintes (definido em 3.2.1 como período de previsão), de modo a ser aplicado na previsão operacional de cheias. Como o modelo de previsão hidrológica é formado essencialmente por métodos de simulação de eventos (como referido em 3.2.1.), os valores dos parâmetros de simulação que variam no tempo – constituindo as condições iniciais do modelo – devem ser ajustados em cada instante de previsão de modo a atualizar o estado hidrológico da bacia no período de simulação. O processo de ajuste desses valores é habitualmente designado por assimilação ou atualização de dados e consiste na utilização dos dados observados mais recentes para corrigir as condições iniciais do modelo antes de cada previsão, aproximando-as mais das condições reais (Liu *et al.*, 2012; Fan, 2015).

Os parâmetros do modelo que permitem representar o estado hidrológico da bacia no início de cada simulação e cuja variação ao longo do tempo tem mais impacto na previsão de cheias são: os parâmetros de calibração, CN e R – como descrito em 3.2.2.1 –, e o caudal inicial, $Q_{t=0}$, na secção de referência de cada sub-bacia definida no modelo hidrológico.

Neste subcapítulo apresenta-se a metodologia para ajustar os valores dos parâmetros de calibração ao longo do tempo, tendo em conta a evolução das condições meteorológicas e hidrológicas na bacia de estudo.

Quanto ao caudal inicial, este é atualizado no início de cada simulação diretamente através dos dados hidrométricos registados em tempo real nas secções de controlo da bacia em estudo.

As secções de controlo são os pontos da rede hidrográfica onde existem registos de caudais em regime natural que podem ser utilizados para: i) definir as condições iniciais do modelo em termos de escoamento fluvial e ii) calibrar os parâmetros de simulação, através da comparação desses registos com os resultados das simulações nesses mesmos pontos.

O processo de calibração dos parâmetros CN e R e o subsequente processo de validação, seguidamente apresentados, baseiam-se em simulações diárias – com um passo temporal de 3 horas e uma extensão de 10 dias (240 horas), conforme definido em 3.2.1 – iniciadas com o caudal observado às 00:00h de cada dia nas secções de controlo da bacia em estudo.

O processo de calibração consiste na realização de várias simulações para cada dia durante um período selecionado, ao longo do qual os parâmetros de calibração são ajustados de forma iterativa. O processo de calibração inicia-se assim com a seleção de um período de 30 dias – doravante designado por período de calibração – no qual se tenha registado pelo menos uma cheia e para o qual se disponha de dados de caudais (com passo temporal de pelo menos 3 horas) registados nas secções de controlo definidas.

Depois, para cada um dos 30 dias do período selecionado, é aplicado o seguinte procedimento (Figura 15):

- Arbitram-se valores iniciais para os parâmetros CN e R dentro dos limites fixados previamente (CN = 30, 40, 50, 60, 70 ou 80);
- Introduz-se no modelo de previsão hidrológica os dados da precipitação observada na bacia em estudo no período de 10 dias seguintes e o caudal inicial registado em cada secção de controlo;
- Executa-se o modelo com as especificações anteriormente definidas: com um passo temporal de 3 horas e uma extensão de 10 dias (240 horas);
- Para cada uma das secções de controlo definidas, comparam-se os hidrogramas observados com os hidrogramas resultantes da simulação, através da análise gráfica e do cálculo de indicadores estatísticos de desempenho do modelo: i) percentagem de viés (PBIAS) e ii) indicador de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) (ver secções 2.3.6 e 3.2.2.4);
- Repete-se o processo, aumentando ou diminuindo os valores dos parâmetros de calibração CN e R nas sub-bacias a montante de cada secção de controlo, até encontrar os valores destes parâmetros que produzem (i) a maior semelhança gráfica entre os hidrogramas resultantes da simulação e os hidrogramas observados, a par com (ii) os melhores valores dos indicadores de desempenho.

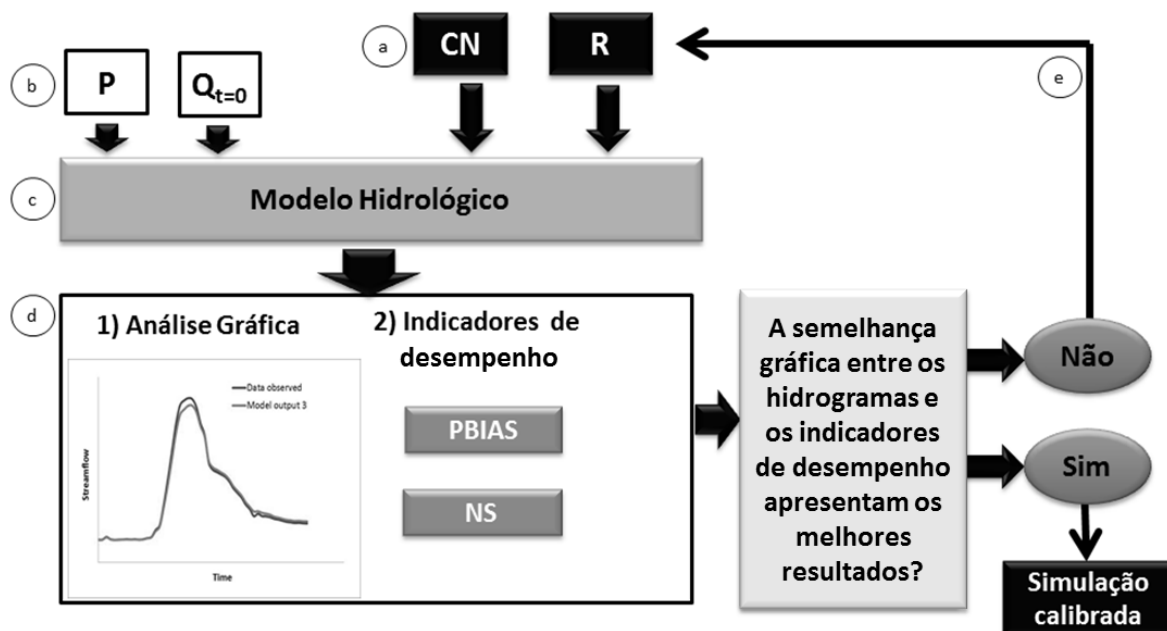


Figura 15. Esquema geral do procedimento utilizado para calibração das simulações realizadas para cada dia do período de calibração selecionado e para cada secção de controlo definida.

Em paralelo, para cada dia do período de calibração, são calculadas as seguintes variáveis hidrometeorológicas (descritas no ponto 3.2.2.1):

- o volume total de escoamento superficial nos 5 dias anteriores à simulação - RV_{-5} ;
- a precipitação total nos 3 dias subsequentes à simulação - TP_{+3} ;
- a precipitação total que ocorreu nos dois meses anteriores à simulação - TP_{-60} .

Os valores finais de CN, obtidos de forma iterativa pelo processo acima descrito, são então correlacionados com os valores de RV_{-5} e de TP_{+3} correspondentes aos mesmos períodos; e os valores de R são correlacionados com os valores de TP_{-60} . Através da análise das relações existentes entre estas variáveis, são estabelecidos critérios para a definição dos valores a atribuir a esses parâmetros do modelo, em função de uma gama de valores definida para cada uma das variáveis correlacionadas. Os critérios estabelecidos permitem ajustar de forma automática esses parâmetros ao longo do tempo, tendo assim em conta as variações nas condições hidrometeorológicas locais.

3.2.2.3. Processo de verificação

Com o processo de verificação pretende-se avaliar se os critérios definidos no processo de calibração podem ser aplicados de forma geral. Para esse fim, nas séries temporais dos dados de caudais registados nas secções de controlo seleccionam-se pelo menos três outros períodos húmidos de duração variável (não coincidentes com o período de calibração). Para cada um dos dias desses períodos seleccionados – doravante designados por períodos de verificação – executam-se simulações hidrológicas, adotando os valores dos parâmetros CN e R obtidos de acordo com os critérios definidos. Comparando os hidrogramas resultantes dessas simulações com os respetivos hidrogramas observados – através da análise gráfica e do cálculo dos correspondentes indicadores de desempenho (ver 3.2.2.4.) – pode-se verificar se os parâmetros estabelecidos no processo de calibração anterior, para um determinado estado hidrometeorológico, continuam a exibir um bom ajuste noutras situações.

3.2.2.4. Avaliação de desempenho do modelo

Para avaliar o desempenho do modelo, tanto na fase de calibração como na de verificação, são empregues os seguintes indicadores estatísticos:

- a) Percentagem de viés:

$$PBIAS = \frac{\bar{Q}_{obs} - \bar{Q}_{mod}}{\bar{Q}_{obs}} * 100 \quad (Eq. 1)$$

- b) Indicador de eficiência de Nash-Sutcliffe:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{mod,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (Eq. 2)$$

Onde: $Q_{obs,i}$ = caudal observado; $Q_{mod,i}$ = caudal resultante do modelo; \bar{Q}_{obs} = caudal médio observado no período de simulação (10 dias); \bar{Q}_{mod} = caudal médio resultante do modelo no período

de simulação (10 dias); e n = número de pontos no conjunto dos dados observados ou simulados, no período de simulação (10 dias).

De acordo com o estabelecido por Moriasi *et al.* (2007), as simulações hidrológicas são classificadas como: i) satisfatórias, quando $|PBIAS| < 25\%$ e $NS > 0,5$; e ii) boas, se $|PBIAS| < 15\%$ e $NS > 0,65$.

3.3. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS DE PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO

3.3.1 DADOS UTILIZADOS

Neste trabalho foram utilizados os dados de previsão de precipitação com alcance até 10 dias, provenientes do modelo de previsão operacional do ECMWF.

Estes dados foram escolhidos por estarem disponíveis para todo o território nacional, por serem amplamente usados em diversos sistemas de previsão operacional e por possuírem um bom desempenho na previsão de precipitação, conforme concluído em diversos estudos recentes, nomeadamente Bougeault *et al.* (2010), Fan *et al.* (2014) e Fan (2015). Além disso, uma vez que esses dados correspondem aos dados de base utilizados a nível nacional para emitir as previsões oficiais de precipitação, devem ser sempre incluídos no conjunto de dados de entrada dos sistemas de previsão de cheias a desenvolver para as bacias hidrográficas nacionais.

Dos produtos do ECMWF, foram consideradas tanto as previsões determinísticas do HRES, como as previsões probabilísticas (ou por *ensemble*) do ENS, cujas características foram apresentadas em 2.2.5 (Quadro 2).

As previsões do HRES são obtidas com a maior resolução horizontal (≈ 14 km) do modelo global do ECMWF, considerando como condições iniciais as estimativas mais precisas das condições reais da atmosfera. Por outro lado, as previsões do ENS são obtidas com uma resolução menor do mesmo modelo do ECMWF (≈ 28 km até 10 dias). A diferença entre os 51 membros do ENS deve-se fundamentalmente às condições iniciais admitidas. Um dos membros do ENS corresponde a uma previsão designada “controlada”, pois integra as mesmas condições iniciais do HRES embora numa resolução menor, enquanto os outros 50 membros, designados por “previsões perturbadas”, são obtidos considerando condições iniciais ligeiramente diferentes, obtidas por pequenas perturbações provocadas nas condições iniciais e nas equações físicas do modelo consideradas para a realização da previsão controlada. Estas perturbações permitem incorporar a incerteza nas observações e no modelo (ECMWF, 2015c).

O ECMWF recomenda a utilização de uma combinação dos dois tipos de dados referidos (ECMWF, 2015c), pelo que se adotou um sistema de previsões por *ensemble* com 52 membros, composto pelos 51 membros das previsões do ENS até 10 dias, e por mais um membro, correspondente aos dados do HRES.

Apesar dos tipos de previsões realizadas pelo ECMWF – HRES e ENS – serem realizados duas vezes por dia, às 00h e às 12h no fuso-horário UTC, neste trabalho apenas se consideraram as primeiras previsões realizadas em cada dia (às 00h UTC).

Assim, para cada dia de um período de análise pré-estabelecido – para o qual se realizarão as previsões hidrológicas – são retiradas as 52 previsões distintas do servidor do ECMWF.

A última alteração da resolução horizontal do modelo de previsão do ECMWF, aplicada ao HRES e ao ENS, ocorreu no início de 2010, concretamente no dia 26/01/2010 (ECMWF, 2015a), pelo que o estabelecimento do período de análise das previsões deve ter em conta este facto. Caso se opte por utilizar previsões de precipitação de um período anterior a essa data, deve-se ter em conta que a resolução desses dados é inferior, o que significa que a dimensão espacial das células dos respetivos dados é maior.

3.3.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS PARA ENTRADA NO MODELO DE PREVISÃO HIDROLÓGICA

Os dados de previsão de precipitação descritos em 3.3.1, depois de descarregados do servidor do ECMWF, têm de ser processados e convertidos para o formato de entrada no modelo de previsão hidrológica.

O processamento de conversão, que tem de ser aplicado independentemente para cada tipo de previsão (devido às diferenças na resolução horizontal), inclui as seguintes etapas:

- 1) leitura dos ficheiros com os dados de previsão, armazenados em formato específico (NetCDF);
- 2) seleção das células dos dados HRES e ENS que intercetam a área da bacia em estudo;
- 3) transposição, por interpolação, dos dados das células seleccionadas em 2), para as sub-bacias de análise definidas no modelo hidrológico, através do método de ponderação das áreas (Figura 16);
- 4) arquivo dos dados de previsão em cada sub-bacia no formato DSS, de modo a ser lido pelo programa HEC-HMS.

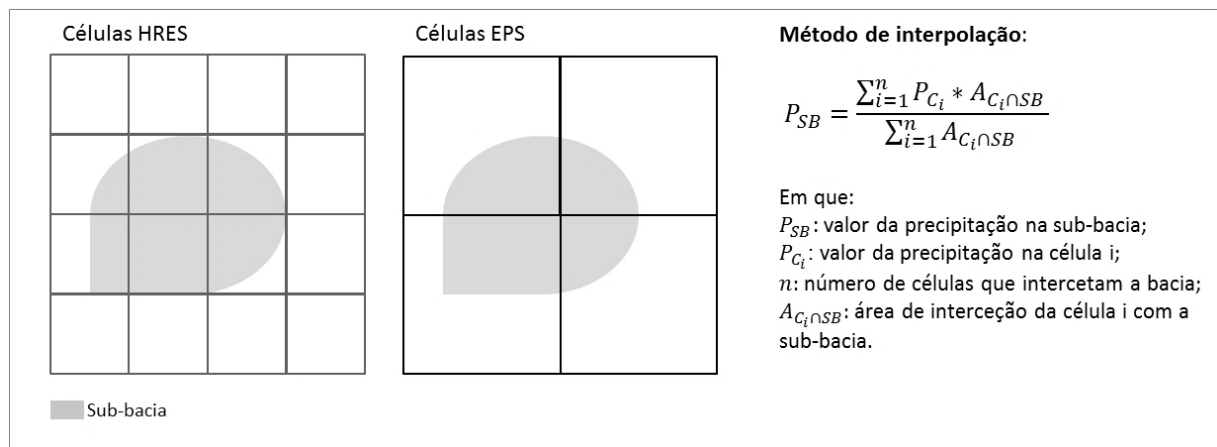


Figura 16. Exemplificação do método de interpolação utilizado para converter os dados de previsão de precipitação em grelha, para cada uma das sub-bacias do modelo hidrológico.

Para realizar este procedimento em tempo útil, para um grande número de dias de previsão, é necessário aplicar rotinas de cálculo automático. No âmbito da presente tese, foi desenvolvida uma rotina em Matlab para realizar as etapas 1 a 3 do procedimento descrito, e uma rotina em Python para o procedimento 4, o qual envolveu o uso da aplicação HEC-DSS.

Dada a resolução espacial atual dos dados de previsão utilizados – considerada já bastante satisfatória, comparativamente com a de outras previsões obtidas com modelos globais – e a dificuldade, comum em Portugal, de se obterem dados de precipitação observada espacialmente distribuídos e compatíveis com as características dos dados de previsão – isto é, com uma distribuição espacial adequada às características fisiográficas das bacias, com um passo temporal de pelo menos 3 horas e com séries contínuas e suficientemente extensas de registos – optou-se por não realizar neste trabalho nenhum tipo de *downscaling* ou tratamento estatístico aos dados de previsão meteorológica.

A opção referida baseou-se também nas conclusões de um estudo preliminar realizado no âmbito desta tese (Mendes e Maia, 2015c), em que se aplicou um método estatístico de *downscaling* às previsões de previsão de precipitação em 3 horas da base de dados ERA-Interim – que, como já referido em 2.6.1.1, resulta da última reanálise do modelo atmosférico do ECMWF – para reduzir a sua escala espacial de 0.75° para 0.125° e para ajustar os valores correspondentes aos valores observados na área da bacia hidrográfica do rio Mondego. A aplicação desse método permitiu, assim, obter previsões de precipitação distribuídas na bacia com uma resolução espacial mais fina e minimizar os erros sistemáticos existentes, melhorando, em muitos casos, as previsões obtidas. No entanto, a nível geral essa melhoria não foi considerada significativa, essencialmente devido à subsistência de erros aleatórios nas previsões, sendo ainda desconhecida a forma de os remover, bem como ao número escasso de estações pluviométricas existentes na área de estudo com dados horários, utilizados no processo estatístico.

3.4. SIMULAÇÃO E PREVISÃO HIDROLÓGICA

A previsão hidrológica consiste na obtenção das previsões dos caudais em regime natural nas secções de referência das sub-bacias definidas no modelo de bacia (ver 3.2.1), através da simulação hidrológica efetuada com base nas previsões de precipitação por *ensemble*.

Além da introdução dos dados de precipitação em cada sub-bacia, o modelo de previsão hidrológica requer também que sejam introduzidas as condições iniciais da simulação (caudais em cada sub-bacia no momento inicial da simulação) e os parâmetros do modelo CN e R, que são definidos em função dos valores das variáveis hidrometeorológicas $RV_{.5}$, TP_{+3} e $TP_{.60}$ (ver 3.2.2).

Assim, em função da disponibilidade de dados de caudais registados (com passo temporal de pelo menos 3 horas) nas sub-bacias em estudo, para operacionalizar o modelo estabelece-se o período de análise para o qual se realizam as previsões hidrológicas.

Para esse período, são adquiridos e processados os dados de previsão de precipitação do ECMWF, conforme descrito em 3.3. Em função das características desses dados, é realizada uma previsão

hidrológica por dia do período de análise. Cada previsão hidrológica consiste na execução de 52 simulações hidrológicas individuais (uma por cada membro da previsão de precipitação por *ensemble* constituída pelos dados ENS e HRES), com início às 00h de cada dia, com um passo temporal de 3h e com um alcance de 240h.

A data da previsão hidrológica é definida como a data de início das simulações correspondentes.

Com os registos dos caudais em cada bacia, é calculada a variável RV_{-5} , convertendo esses valores em volumes de escoamento nos cinco dias anteriores à data da previsão. As variáveis TP_{+3} e TP_{-60} são determinadas com base na média da previsão de precipitação por *ensemble* para cada sub-bacia. A TP_{+3} corresponde, em cada dia de previsão, à soma dos valores de precipitação médios previstos para os próximos três dias, e a TP_{-60} corresponde à soma dos valores de precipitação médios previstos para o dia seguinte, em cada um dos sessenta dias anteriores à data da previsão.

Estando o modelo hidrológico operacional para cada dia de previsão – com os caudais iniciais, os parâmetros de simulação e os dados de previsão de precipitação correspondentes incluídos – executam-se, para cada dia, as simulações hidrológicas correspondentes a cada membro da previsão de precipitação por *ensemble*, obtendo-se 52 previsões diárias de caudais para 10 dias, na secção de referência de cada uma das sub-bacias definidas.

Os resultados das previsões hidrológicas devem ser extraídos do modelo ao fim de cada simulação realizada. Reunindo, por cada dia, os resultados das 52 simulações em cada secção, obtêm-se as previsões de caudais por *ensemble* em cada secção de referência.

Por último, é realizada uma transformação das previsões de caudais por *ensemble* em seis previsões singulares – doravante denominadas por previsões determinísticas –, correspondentes aos percentis 25, 50, 75 e 90, ao valor médio e ao valor máximo da distribuição dos conjuntos de membros ao longo do período de previsão (Figura 17).

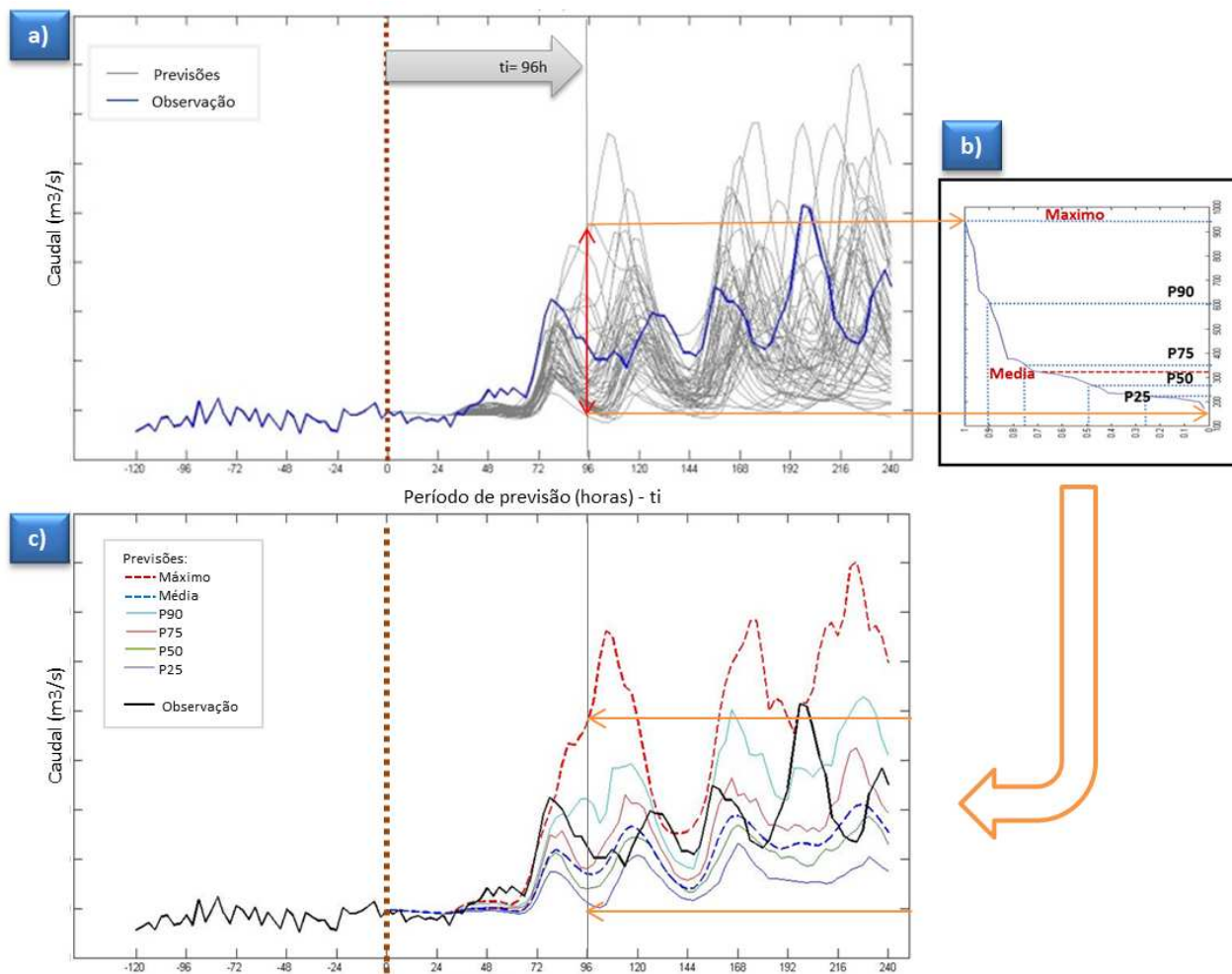


Figura 17. Esquema exemplificativo do processo de transformação de uma previsão por *ensemble* em múltiplas previsões determinísticas correspondentes aos percentis 25, 50, 75 e 90, à média e ao máximo da distribuição do conjunto de membros em cada período de previsão: a) previsão de caudal por *ensemble* composta por 52 membros, para um alcance temporal de 240h; b) distribuição dos membros da previsão por *ensemble* para um dado período de previsão; c) conjunto de previsões determinísticas obtidas através do cálculo das medidas de posição indicadas para cada um dos períodos de previsão (0-240h).

Em síntese, o procedimento para realizar e tratar cada uma das previsões hidrológicas (diárias) inclui as seguintes etapas:

- 1) introdução no modelo dos dados de previsão de precipitação por *ensemble* em cada sub-bacia;
- 2) cálculo do valor das variáveis RV_{-5} , TP_{+3} e TP_{-60} e, em função desses valores, definição dos parâmetros do modelo CN e R para cada sub-bacia;
- 3) introdução no modelo dos valores dos caudais iniciais e dos parâmetros do modelo CN e R para cada sub-bacia;
- 4) execução de uma simulação hidrológica para cada membro da previsão de precipitação por *ensemble* (52 simulações no total), com início às 00h, com um passo temporal de 3h e com um alcance de 240h;

- 5) extração do modelo, após cada simulação realizada, dos resultados das previsões dos caudais nas secções de referência;
- 6) reunião dos resultados das 52 simulações por cada secção, obtendo as previsões de caudais por *ensemble* em cada secção de referência;
- 7) transformação das previsões por *ensemble* nas previsões determinísticas correspondentes aos percentis 25, 50, 75 e 90, à média e ao máximo do conjunto.

Este procedimento é repetido para todos os dias do período de análise estabelecido.

Dada a grande quantidade de dados utilizados e a complexidade do processo, para realizar este procedimento em tempo útil, para um grande número de dias de previsão, é necessário utilizar rotinas de cálculo automático. Para tal, foram também desenvolvidas rotinas em Matlab para realizar as etapas 2, 6 e 7 do procedimento descrito, e rotinas em Python para automatizar os restantes passos do procedimento, que envolveram o uso da aplicação HEC-DSS e, na etapa 4, o uso do programa HEC-HMS. Desta forma, em poucos segundos é possível obter as previsões hidrológicas para cada do período de análise.

3.5. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DAS PREVISÕES HIDROLÓGICAS

O objetivo da análise e verificação das previsões hidrológicas aqui apresentada é conhecer qual é o grau de confiança que se pode esperar dessas previsões, ou seja, em que medida é que as previsões hidrológicas são – de uma forma geral e em casos concretos de ocorrência de caudais elevados que podem causar situações de cheia – próximas dos valores observados.

O conceito de previsões por *ensemble* implica a obtenção de um grande número de resultados de previsão para o mesmo período. No entanto, face à incerteza existente nesses resultados, é necessário adotar uma previsão de referência para a tomada de decisões operacionais na gestão das albufeiras e na adoção de medidas de controlo e proteção contra cheias. Essa previsão de referência deve ter em conta parâmetros estatísticos relevantes, nomeadamente a proximidade das várias previsões realizadas para o mesmo período (consistência), bem como a proximidade aos dados correspondentes observados (qualidade).

Neste contexto, no presente trabalho propõe-se que a decisão da previsão de referência, a utilizar na gestão operacional das albufeiras, seja tomada com base na análise e verificação das previsões hidrológicas realizadas (ver 3.4), a qual deve incidir nas seguintes ações:

- Análise estatística da dispersão das previsões por *ensemble* - avaliação da consistência;
- Comparação dos valores previstos com os valores observados - avaliação da qualidade.

3.5.1 AVALIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA

Neste trabalho, a consistência das previsões de caudais é avaliada segundo duas perspetivas: i) avaliando o grau de concordância entre os vários membros das previsões realizadas num mesmo

instante (dia) – representado através da dispersão das previsões por *ensemble*; e ii) avaliando o grau de concordância entre previsões realizadas em dias consecutivos.

São utilizados dois tipos de abordagem para avaliar a concordância: uma avaliação visual e uma avaliação estatística. A avaliação visual foca-se apenas na análise gráfica da dispersão das previsões relativas a situações pontuais, correspondentes às principais cheias registadas num período de análise. A análise estatística permite ter uma medida média da consistência das previsões por *ensemble* para cada período de previsão, em todo o período de análise.

Para avaliar a consistência na primeira perspetiva, ou seja, através da análise do grau de concordância entre os vários membros da previsão por *ensemble*, é calculado o desvio padrão, por período de previsão, para todas as previsões por *ensemble* realizadas (uma por cada dia, durante o período de análise). Através da análise do valor médio dos desvios padrão obtidos para cada período de previsão, é possível caracterizar a dispersão dos membros das previsões por *ensemble* ao longo do período de previsão.

O desvio padrão médio, para cada período de previsão, é calculado através da seguinte fórmula:

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{i,j} - \bar{x}_j)^2} \quad (Eq. 3)$$

Em que: \bar{s} é o desvio padrão médio; N é o número total de previsões por *ensemble* avaliadas; n é o número de membros de cada previsão por *ensemble*, $x_{i,j}$ é o valor correspondente ao membro i da previsão por *ensemble* realizada no dia j e \bar{x}_j é o valor médio dessa previsão.

Para avaliar a consistência na segunda perspetiva, ou seja, avaliando o grau de concordância entre previsões realizadas em dias consecutivos, é calculado o valor médio, por período de previsão, dos desvios entre as previsões realizadas nos dias j e as previsões realizadas nos t dias anteriores (j-t) para os mesmos instantes de previsão, utilizando a seguinte fórmula:

$$\bar{d}_t = \frac{1}{N-t} \sum_{j=1+t}^N (x_j - x_{j-t}) \quad (Eq. 4)$$

Em que: \bar{d}_t é o desvio médio, por período de previsão (dentro de um período de avaliação Δh), entre previsões realizadas com t dias de espaçamento temporal para o mesmo período de avaliação. Este processo aplica-se a previsões determinísticas, e por isso é calculado independentemente para cada uma das previsões correspondentes às medidas de posição definidas em 3.4, ou seja, para os percentis 25, 50, 75 e 90, para a média e para o máximo das previsões por *ensemble*.

Na Figura 18, apresenta-se um exemplo de previsões determinísticas realizadas em 6 dias consecutivos, para um mesmo período de avaliação de 120 horas. Neste exemplo, para avaliar a concordância destas previsões pelo método aqui apresentado, é calculado o desvio existente entre a

previsão emitida no início do período de avaliação (x) e cada uma das previsões realizadas antes do período de avaliação ($x-t$, em que $t=[1; 2; 3; 4; 5]$).

No presente trabalho, dado o alcance temporal das previsões ser de 10 dias, o período temporal máximo de avaliação da consistência é de 120 horas.

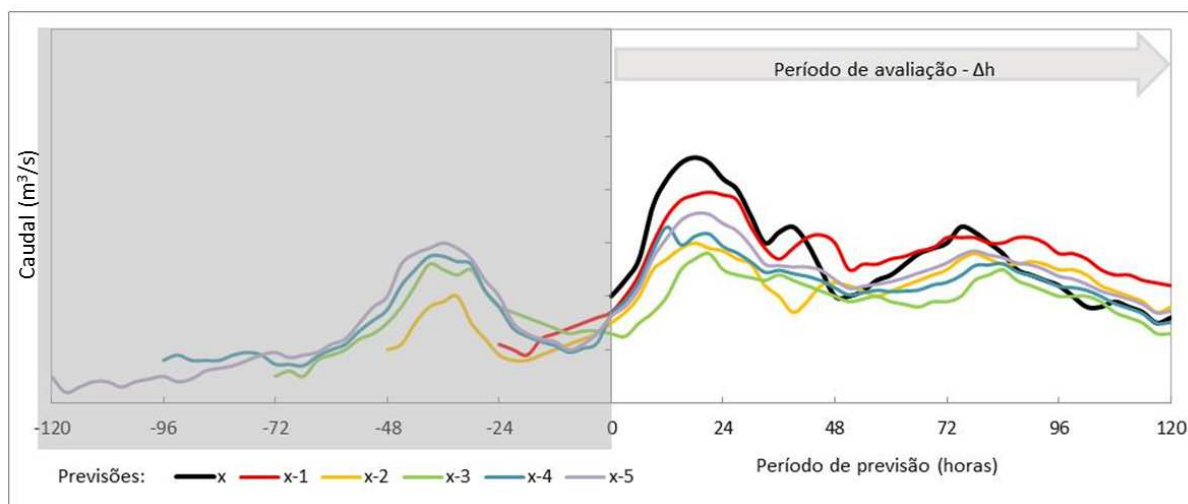


Figura 18. Esquema exemplificativo do processo de avaliação da consistência de previsões sucessivas: exemplo de previsões determinísticas realizadas em 6 dias consecutivos.

3.5.2 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE

A qualidade das previsões de caudais é avaliada também utilizando os dois tipos de abordagem utilizados para avaliar a consistência. Primeiro, é realizada uma análise visual das previsões relativas às principais cheias registadas no período de análise, comparando os hidrogramas previstos com os observados nos principais pontos de interesse onde existem dados disponíveis. Depois, os resultados das previsões são avaliados através dos métodos (medidas e processos estatísticos) apresentados no Quadro 9.

Quadro 9. Métodos estatísticos utilizados para a avaliação da qualidade das previsões, por tipo de atributo considerado, com a respetiva classificação em termos de tipo de previsão a que é aplicada: determinística e/ou por *ensemble*, focada (S) ou não (N) na excedência de um determinado limiar; e com a descrição do resultado ideal (que caracteriza uma qualidade ótima).

Atributo	Métodos de avaliação utilizados	Tipo de previsão		Resultado ideal
Erro total	<i>Mean Absolute Error (MAE)</i>	Determinística	N	Valor igual a 0
	<i>Mean Continuous Rank Probability Score (MCRPS)</i>	<i>Ensemble</i>	N	Valor igual a 0
	<i>Brier Score (BS)</i>	<i>Ensemble</i>	S	Valor igual a 0
Viés	<i>Relative Mean Error (RME)</i>	Determinística	N	Valor igual a 0
Confiança	<i>Rank Histogram</i>	<i>Ensemble</i>	S	Histograma horizontalmente uniforme
Discriminação	<i>Relative Operating Characteristic Diagram (ROCD)</i>	Ambas	S	Pontos situados no canto superior esquerdo do diagrama (POD=1 e POFD=0).

Tendo em conta o âmbito da aplicação das previsões no presente trabalho – a previsão de cheias para a gestão operacional de albufeiras nessas situações – procurou-se escolher um conjunto de medidas e processos estatísticos capaz de descrever os atributos de qualidade considerados mais importantes para essa utilização, designadamente: o erro total, o viés, a confiança e a discriminação (ver 2.4.2). Como para cada um desses atributos existem vários métodos de avaliação que podem ser utilizados (ver Quadro 7), foi selecionado apenas um método por atributo, à exceção da avaliação do erro total, em que se consideraram três medidas estatísticas, por se dirigirem a diferentes tipos de previsão. O critério para seleção desses métodos baseou-se na sua utilização noutros trabalhos e recomendações da bibliografia para aplicações semelhantes (Bradley *et al.* (2003 e 2004), Cloke e Pappenberger 2009; Brown *et al.* 2010; Fan *et al.*, 2015; Fan, 2015) e na possibilidade dos respetivos resultados serem obtidos através da aplicação EVS (ver 2.4.2).

Os métodos de avaliação da qualidade específicos para previsões determinísticas – MAE e RME – são aplicados às várias medidas de posição das previsões por *ensemble*, definidas em 3.4, ou seja, para os percentis 25, 50, 75 e 90, para a média e para o máximo da distribuição dos conjuntos. Desta forma, as previsões por *ensemble* são representadas por seis previsões determinísticas.

Todos os métodos de avaliação aqui indicados são aplicados com um passo temporal de 3h e um alcance de 240h, obtendo-se assim os resultados correspondentes para cada período de tempo (0 - 240h).

No Anexo 2, são apresentadas explicações sucintas de cada um dos métodos utilizados na presente tese para avaliação da qualidade das previsões hidrológicas.

3.6. OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO OPERACIONAL DE ALBUFEIRAS EM SITUAÇÕES DE RISCO DE CHEIA

3.6.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO DE GESTÃO OPERACIONAL DE ALBUFEIRAS

Tendo em conta as previsões de referência dos caudais afluentes, em regime natural, às secções críticas no controlo de cheias na bacia – nomeadamente albufeiras com capacidade de amortecer cheias e locais sensíveis à afetação pelas cheias, como núcleos urbanos, instalações industriais, etc. – foi desenvolvido um modelo de apoio à decisão para otimizar a gestão operacional de sistemas de albufeiras em situações de risco de cheia, em que a função de controlo de cheias a jusante pode ser um fator limitador das restantes utilizações.

Nesta secção da dissertação apresenta-se a metodologia adotada para a construção desse modelo que, com base nas previsões diárias dos caudais afluentes às albufeiras nos 10 dias seguintes, permite determinar o caudal a descarregar, nas próximas 24 horas, por cada uma das albufeiras do sistema, de modo a: i) minimizar os impactos a jusante, quando ocorrer uma cheia, e ii) não condicionar as restantes funções dos aproveitamentos, quando não houver previsão de eventos de cheia, mantendo os níveis das albufeiras tão elevados quanto possível, sem comprometer as condições de segurança das suas estruturas (barragem e órgãos de descarga) (Figura 19).

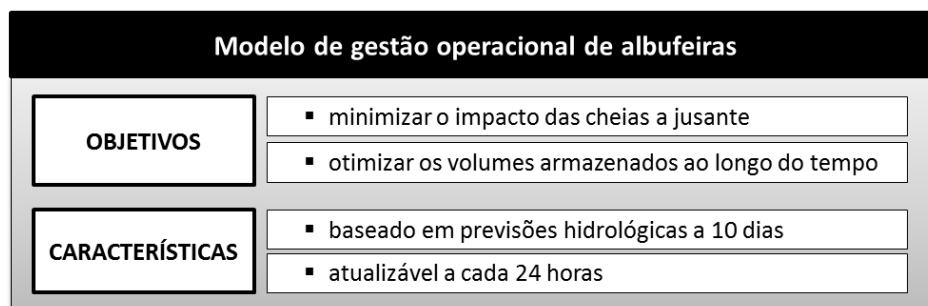


Figura 19. Características do modelo de gestão operacional de albufeiras.

Como o objetivo do trabalho consiste na otimização dos volumes armazenados nas albufeiras tendo em conta várias condicionantes, o desenvolvimento do modelo de gestão operacional de albufeiras baseou-se num modelo de programação linear (PL).

A função-objetivo considerada consiste na minimização do volume descarregado pelo conjunto das albufeiras do sistema.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n (c_i V_i) \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que, c_i são coeficientes da função objetivo e V_i as variáveis do modelo, que correspondem aos volumes descarregados em cada instante ($\text{hm}^3/3\text{h}$) pelos n diferentes órgãos de descarga das albufeiras. A função-objetivo é, assim, aplicada em cada instante ao longo do período de previsão, ou seja, de 3 em 3 horas até às 240 horas.

Os coeficientes da função-objetivo permitem definir prioridades de utilização dos diferentes órgãos. Como a função é de minimização, valores menores destes coeficientes dão mais prioridade à descarga pelo órgão correspondente e vice-versa.

As entradas do modelo consistem nos volumes afluentes de referência previstos, em regime natural, às secções críticas no controlo de cheias na bacia. As previsões de referência para a tomada de decisões operacionais na gestão das albufeiras e a adoção de medidas de controlo e proteção contra cheias são obtidas conforme o descrito em 3.4 e 3.5.

Através de um conjunto de restrições incluídas no modelo, são definidas as características de armazenamento das albufeiras e de vazão dos seus órgãos de descarga, bem como limitações do caudal afluente a secções localizadas a jusante do sistema de albufeiras. Desta forma, o modelo é composto pelos seguintes tipos de restrições:

- a) Restrições de domínio das variáveis: definição do valor mínimo e do valor máximo do volume que pode ser descarregado em cada instante por cada órgão de descarga do sistema de albufeiras;
- b) Limitação dos níveis nas albufeiras através da relação com os volumes armazenados: inequação que limita o volume total que pode ser descarregado em cada instante por cada albufeira em função do volume aí armazenado, sendo definido um valor máximo e mínimo através da curva de capacidade de armazenamento de cada albufeira;
- c) Limitação do caudal máximo afluente a secções a jusante das albufeiras:
 - c.1) Tendo em conta as afluições previstas para cada instante: inequação que limita o volume total que pode ser descarregado em cada instante pelo conjunto das albufeiras a montante de uma determinada secção fluvial, em função do caudal afluente máximo definido para essa secção;
 - c.2) Tendo em conta as afluições globais previstas para o total do alcance de previsão: procedimento que, tendo em conta i) as previsões dos volumes afluentes para os 10 dias seguintes, ii) o caudal afluente máximo definido para uma secção a jusante das albufeiras e iii) a capacidade de armazenamento das albufeiras, calcula o volume que é necessário descarregar antecipadamente por cada uma das albufeiras, para criar capacidade de encaixe que evite que o volume total descarregado em cada instante pelo conjunto das albufeiras ultrapasse o valor do caudal afluente máximo definido para a secção em causa. Dada a incerteza das previsões dos caudais afluentes, nomeadamente para períodos de previsão de 10 dias, e para evitar que o volume de encaixe fosse gerado sempre no início do período de previsão, optou-se por aplicar o processo de amortecimento de caudais de cheia do final para o início do período de previsão, conforme apresentado na Figura 20.

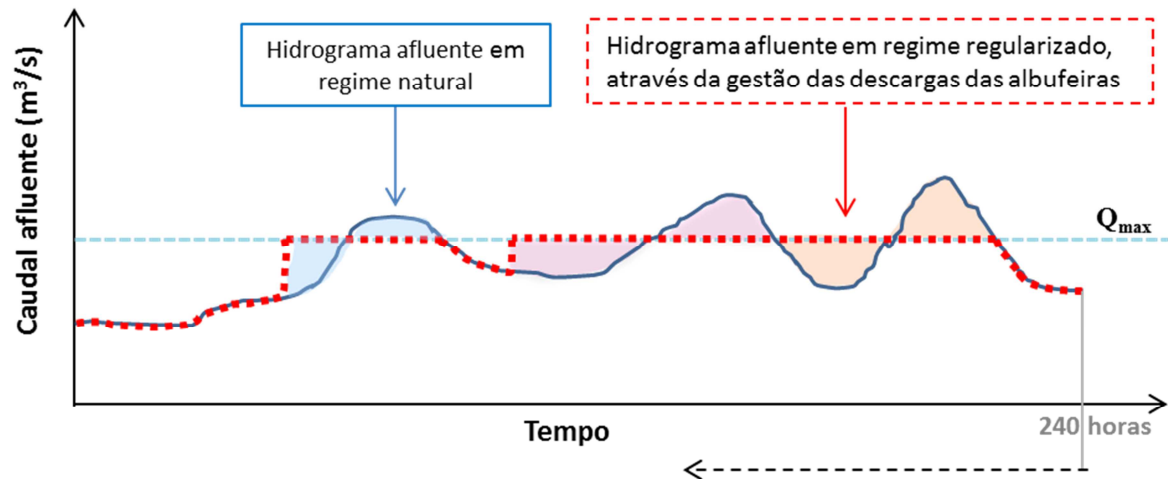


Figura 20. Esquema ilustrativo do processo de limitação do caudal máximo afluente (Q_{max}) a uma secção a jusante do sistema de albufeiras, tendo em conta as afluências futuras previstas.

3.6.2. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO

A avaliação do desempenho do modelo é realizada através da avaliação dos seus resultados para vários eventos de cheia com características distintas – diferentes magnitudes e distribuição temporal e espacial – e da comparação destes com os resultados da aplicação de outros modelos ou procedimentos de gestão do sistema de albufeiras.

Na presente tese, foram estabelecidos os seguintes resultados como indicadores de desempenho do modelo:

- i) o nível médio de água nas albufeiras;
- ii) o caudal máximo afluente a uma secção de referência definida a jusante do sistema de albufeiras;
- iii) o número de horas em que o caudal afluente a essa secção de referência é maior do que o valor máximo estipulado para essa secção.

No caso dos modelos e/ou procedimentos de gestão de albufeiras utilizados para comparação com o modelo desenvolvido no âmbito desta tese não integrarem uma componente de previsão – como é o caso do panorama existente a nível nacional – a avaliação do desempenho do modelo estará relacionada com a avaliação do valor das previsões, uma vez que a utilização do modelo corresponde ao resultado que a utilização das previsões terá em termos efetivos. Como referido em 2.4, o valor das previsões é definido como o grau de utilidade das previsões em termos económicos ou de outros benefícios mensuráveis.

4

CASO DE ESTUDO

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é delimitado e caracterizado o caso de estudo, descrevendo as principais características da bacia e do sistema fluvial e regulado do Mondego, bem como os dados utilizados ao longo do estudo. Depois são descritos os processos inerentes à aplicação da metodologia geral apresentada no Capítulo 3 ao caso de estudo escolhido.

4.2. SELEÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Numa fase inicial do desenvolvimento da tese ponderaram-se duas hipóteses para a bacia hidrográfica regularizada a adotar como caso de estudo, atendendo também à ponderação sobre o assunto havida em reuniões com a EDP e com a APA: a bacia do rio Cávado ou a bacia do rio Mondego. Em qualquer um dos casos, as cheias são relativamente rápidas, com intervalos de tempo da ordem das poucas horas entre o início da cheia e o pico do caudal, podendo ser particularmente perigosas devido ao aumento brusco do nível de escoamento.

Como um dos objetivos da metodologia de previsão e alerta de cheias aqui desenvolvida é o de permitir às empresas concessionárias dos aproveitamentos hidroelétricos a readequação e otimização das regras de exploração das albufeiras, em períodos de grande incerteza relativamente à ocorrência desses eventos, a bacia hidrográfica a selecionar teria de ter características hidromorfológicas favoráveis à previsão atempada de cheias e ter capacidade de regularização suficiente para, através da gestão de volumes armazenados, amortecer os caudais máximos de cheia, possibilitando dessa forma a minimização dos impactos a jusante. Assim, a seleção do caso de estudo foi uma tarefa essencial na delineação do projeto da tese, tendo sido um processo evolutivo, com recurso a revisão bibliográfica, a consulta de entidades e, por fim, a uma ponderação criteriosa em função da informação recolhida, dos pareceres obtidos e dos objetivos da tese.

Como ponto de partida, optou-se pela realização de uma análise das principais características das duas bacias hidrográficas – Cávado e Mondego –, em termos de: hidromorfologia, grau de exploração

hidroelétrica, presença de povoações sujeitas a cheias fluviais e capacidade de regularização de caudais.

Dessa caracterização resultou então que, no que toca à bacia do rio Mondego, o principal motivo para a sua escolha consiste na presença do Sistema Regulado Fronhas-Aguieira-Raiva, explorado pela EDP, que inclui nas suas funções a regularização de cheias, e que está localizado imediatamente a montante de uma cidade ribeirinha de grande dimensão (Coimbra), potenciando assim o efeito benéfico da previsão de cheias na gestão operacional das albufeiras. Neste caso, a existência de um sistema de previsão de cheias associado à gestão dessas albufeiras, poderá ser um instrumento útil no diálogo entre a EDP e a APA, quando se trata da reserva de volumes de armazenamento para amortecimento de cheias. Pela dimensão da bacia e pelas suas características morfológicas, a bacia do Mondego apresenta também um potencial elevado de garantir bons resultados de simulação hidrológica e permite uma antecedência de aviso superior à maioria dos outros rios, onde as cheias são mais intempestivas (excluindo os rios internacionais, que têm a grande desvantagem de dependerem de Espanha).

Em contrapartida, a bacia do rio Cávado localiza-se na região mais pluviosa de Portugal e integra uma série de grandes aproveitamentos em cascata, de fim essencialmente hidroelétrico, integrando o designado sistema Cávado-Rabagão-Homem. Nesses aproveitamentos foram previstos alguns reforços de potência, um deles nomeadamente (Venda Nova III) com o objetivo de funcionamento por bombagem pura, cuja realização foi entretanto já maioritariamente concluída ou em vias de conclusão. A jusante destes aproveitamentos, localizam-se alguns aglomerados importantes, como Barcelos, Fão e Esposende, com zonas edificadas em áreas marginais, sujeitas a cheias (INAG, 2000; ARH-Norte, 2011). No entanto, os aproveitamentos existentes na bacia não têm nem a função (específica), nem volumes de regularização suficientes para minimização dos efeitos de cheias. Neste sentido, a gestão das cheias nesta bacia baseia-se essencialmente em ações de resposta e de emergência, tomadas com base na experiência de situações passadas. Assim, a previsão de cheias nesta bacia seria benéfica para o alerta atempado das povoações ribeirinhas, no sentido da preparação para as cheias, mas não teria utilidade prática na gestão dos volumes de água dos aproveitamentos hidráulicos para o amortecimento das pontas de cheia, dado não terem capacidade de essa cumprir tal função.

Após essa análise inicial, foram consultadas as duas entidades com responsabilidade e interesse nestas matérias, EDP e APA, para obter os pareceres sobre a adequabilidade e mais-valias de cada uma das bacias, para o desenvolvimento e aplicação de uma metodologia de previsão e alerta de cheias. Nesta questão, as duas entidades consultadas foram favoráveis à adoção da bacia do Mondego. Dadas as características das suas bacias e o parecer unívoco das duas entidades, foi concluído o processo de decisão do caso de estudo, escolhendo-se a bacia do rio Mondego como caso de estudo e aplicação da metodologia desenvolvida.

No prolongamento deste capítulo será então apresentada uma caracterização da bacia do rio Mondego, descrevendo as características gerais da bacia e alguns pontos considerados mais relevantes para a elaboração do trabalho proposto (descrito no capítulo seguinte).

4.3. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MONDEGO

4.3.1. CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA

Localizada no centro de Portugal, a bacia hidrográfica do rio Mondego apresenta uma forma retangular alongada com uma orientação predominante de NE-SW (Figura 21) e compreende uma área total de aproximadamente 6650 km², sendo limitada a este e a norte pelas bacias dos rios Vouga e Douro e, a sul, pelas bacias dos rios Tejo e Lis. A altitude média da bacia é da ordem dos 375 m (INAG, 2001a).

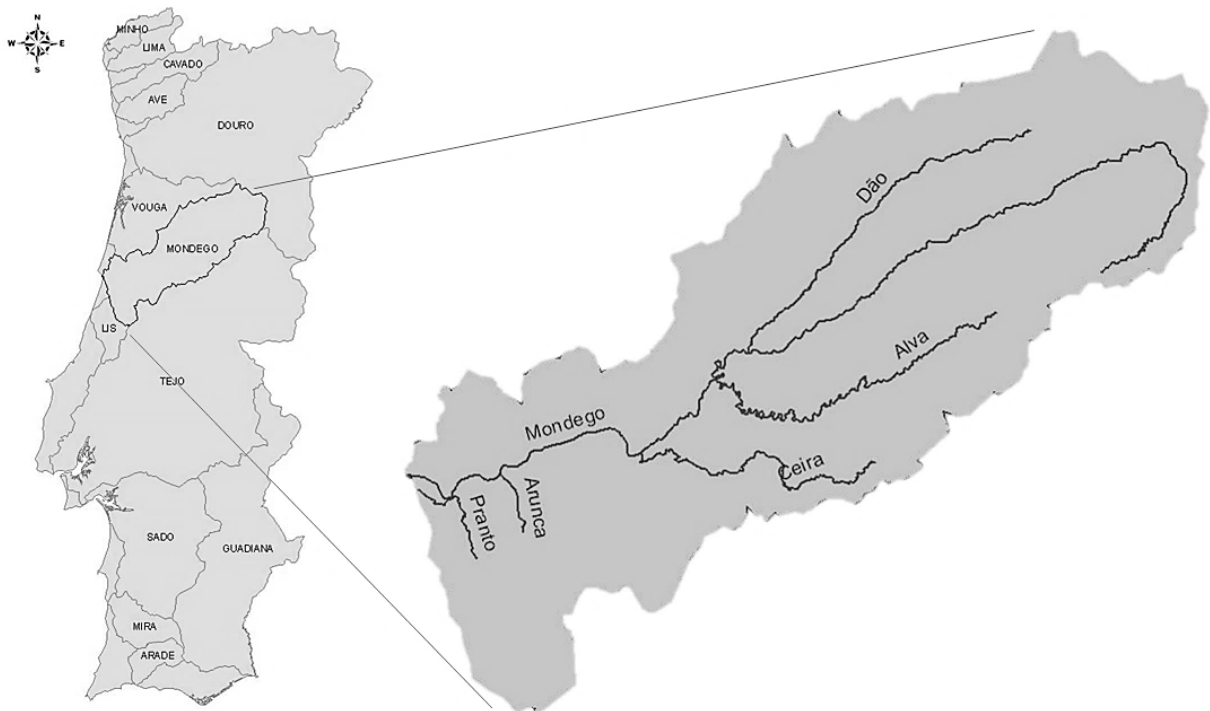


Figura 21. Localização relativa da bacia hidrográfica do rio Mondego (à esquerda), e do rio Mondego e dos seus principais afluentes (à direita).

O rio Mondego nasce na Serra da Estrela, a 1525 m de altitude, no concelho de Gouveia e desagua no Oceano Atlântico, junto à Figueira da Foz, percorrendo uma distância de aproximadamente 258 km (INAG, 2001a).

Segundo o Plano de Bacia Hidrográfica (PBH) do rio Mondego (INAG, 2001a), a rede hidrográfica principal da bacia do rio Mondego é composta pelos seguintes afluentes: o rio Dão, na margem direita e, os rios Pranto, Arunca, Ceira e Alva, todos na margem esquerda (Figura 21).

O rio Dão, o maior dos afluentes do rio Mondego, nasce próximo de Aguiar da Beira, à cota 840, e conflui com o rio Mondego, imediatamente a montante da barragem de Aguireira. A sua bacia hidrográfica drena uma área de 1377 km² e a linha de água principal tem uma extensão total de cerca de 92 km. É um rio tipicamente de planalto, sem grandes declives.

O rio Alva é o primeiro dos afluentes mais importantes da margem esquerda do rio Mondego, confluindo com ele a cerca de 4 km a montante da ponte de Penacova, drenando uma área de cerca de 708 km². A sua nascente situa-se à cota 1700 m, na Serra da Estrela, próximo de Sabugueiro. Com um relevo bastante acentuado, o rio Alva vence um desnível total de cerca de 1650 m numa extensão de 111 km.

O rio Ceira nasce na Serra do Açor, próximo da cota 1150 m, e conflui com o rio Mondego em Coimbra, após percorrer cerca de 100 km. A sua bacia hidrográfica drena uma área de 737 km².

O rio Arunca (ou rio Soure, como também é designado) nasce perto da povoação de Albergaria dos Doze, no concelho de Pombal, e desagua na margem esquerda do Rio Mondego, em plena região do Baixo Mondego, a três quilómetros a jusante da vila de Montemor-o-Velho. O rio Arunca tem uma área de bacia hidrográfica de 765 km² e desenvolve-se ao longo de 57 km.

O rio Pranto (ou rio Carnide), o último afluente importante da margem esquerda do rio Mondego, nasce no concelho de Leiria e desagua junto a Alqueidão, no concelho da Figueira da Foz, vencendo um desnível máximo de cerca de 200 m ao longo dos 43 km de extensão do seu percurso. A bacia hidrográfica do rio Pranto tem uma área de cerca de 273 km².

Em relação às principais características morfológicas e ao tipo de vales que o rio Mondego atravessa ao longo do seu percurso, podem distinguir-se os seguintes troços (INAG, 2001a):

- Alto Mondego - troço de rio inserido no maciço da Serra da Estrela, que corre ao longo de vales glaciares. É neste troço que o rio apresenta maior inclinação, mostrando um carácter torrencial muito acentuado;
- Médio Mondego - troço de rio entre o sopé da Serra da Estrela e Coimbra, onde o rio se desenvolve através de vales encaixados. Neste troço, afluem os rios Dão, Alva e Ceira;
- Baixo Mondego - troço de rio a jusante de Coimbra, que corre em vales abertos, em zona de planícies. Neste troço, afluem os rios Arunca e Pranto.

Na Figura 22 apresenta-se a carta hipsométrica da região onde se localiza a bacia hidrográfica do rio Mondego.

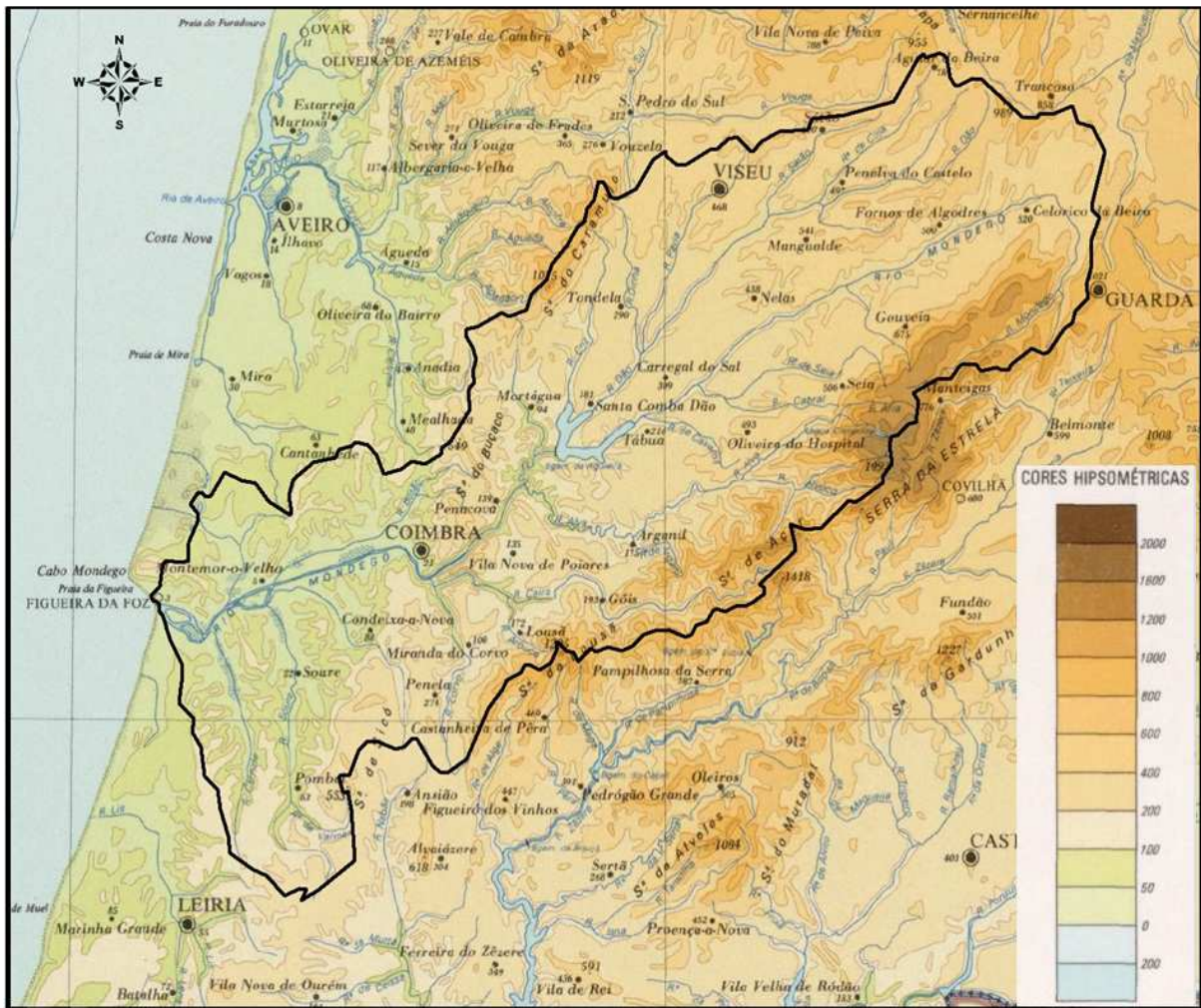


Figura 22. Carta hipsométrica da região da bacia hidrográfica do rio Mondego (adaptado de IGP, 2012).

4.3.2. CONTEXTO ADMINISTRATIVO

A bacia do rio Mondego abrange diversos concelhos dos distritos da Guarda, Viseu, Coimbra e Leiria e Aveiro. Em termos administrativos e de planeamento e gestão da água, esta bacia integra, juntamente com as bacias dos rios Vouga e Lis, a Região Hidrográfica 4 (RH4), sob jurisdição da ARH-Centro (Administração da Região Hidrográfica do Centro).

4.3.3. OCUPAÇÃO DO SOLO

A ocupação do solo na área da bacia do rio Mondego, obtida com base no *Corine Landcover* de 2006, compõe-se predominantemente por áreas florestais (64,2%), seguindo-se, por ordem de representatividade, as áreas agrícolas (31,6%), as áreas urbanas (2,5%) e, por fim, as áreas industriais (0,5%). A área litoral apresenta uma reduzida ocupação florestal relativamente à restante área da bacia, mas, por sua vez, é a zona em que a ocupação urbana e industrial é mais acentuada. O interior da

região denota uma menor e mais dispersa ocupação urbana, sendo a maior concentração em torno de Viseu. Os espaços agrícolas distribuem-se um pouco por toda a área da bacia (ARH-Centro, 2011a).

4.3.4. GEOLOGIA

Do ponto de vista geológico e geomorfológico, a região hidrográfica onde se insere a bacia do Mondego (RH4) é constituída por duas grandes unidades geológicas e também morfo-estruturais: o Maciço Antigo (também designado Maciço Hespérico) e a Orla Mesocenozóica Ocidental (ARH-Centro, 2011a).

A partir da Carta Litológica do Atlas do Ambiente podemos constatar que a bacia do rio Mondego é constituída principalmente por granitos e afins (40%), xistos (27%), areias, cascalheiras e aluviões (20%), ocorrendo igualmente calcários e grés (6%) (INAG, 2012).

4.3.5. CLIMA

De uma forma geral, o clima na bacia hidrográfica do rio Mondego é temperado, sendo progressivamente mais húmido com o aumento da altitude e no interior da bacia. Nas regiões próximas do litoral, o clima é temperado e pouco húmido, com invernos suaves e verões quentes particularmente na região de Coimbra. Na região de Viseu e da Guarda o clima é muito húmido, tornando-se ainda mais húmido nas zonas mais elevadas das serras da Estrela e Caramulo, com verões frescos e invernos rigorosos, ocorrendo frequentemente nevões e geadas nessa região. A influência do relevo é assim particularmente marcada, originando um acentuado aumento da precipitação e diminuição da temperatura com a aproximação às zonas montanhosas (INAG, 1999).

Este clima resulta da proximidade ao Mar Mediterrâneo e ao Oceano Atlântico. A influência mediterrânica faz-se sentir sobretudo no verão, estando associada a temperaturas e valores de insolação elevados e a quantidades de precipitação nulas ou muito reduzidas. A influência atlântica caracteriza-se pelas superfícies frontais preponderantes no Inverno e que, deslocando-se de oeste para este (para o interior da bacia), dão origem à maior parte da precipitação que ocorre na bacia (INAG, 1999).

Segundo o Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis integradas na Região Hidrográfica 4 (PGRH4) (ARH-Centro, 2011a), a precipitação média ponderada na bacia do rio Mondego é de 1073 mm em ano médio, 423 mm em ano seco, e de 1698 mm em ano húmido.

Em ano médio, a distribuição da precipitação média mensal na bacia segue a representação da Figura 23, evidenciando-se que os maiores volumes de precipitação ocorrem entre os meses de outubro a março (semestre húmido).

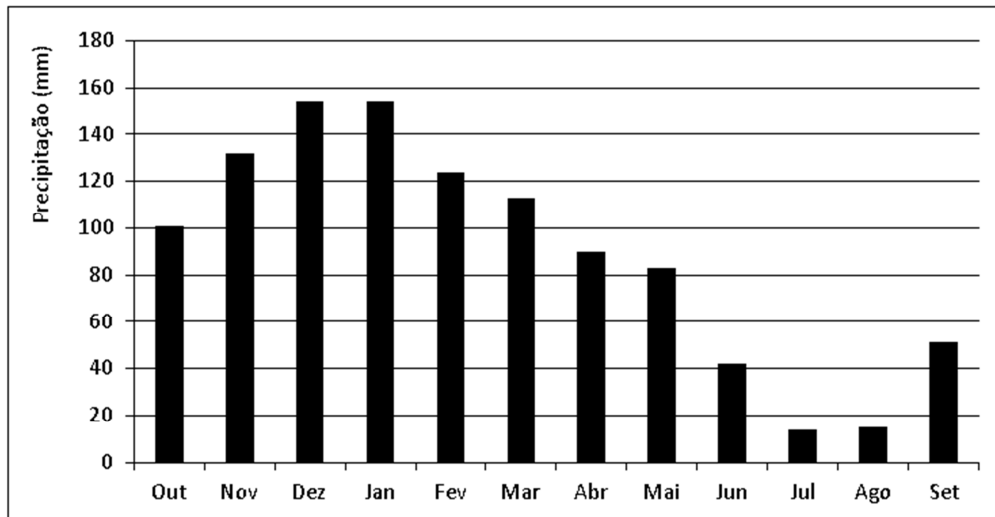


Figura 23. Precipitação média mensal ponderada na bacia do rio Mondego, em ano médio (ARH-Centro, 2011a).

Relativamente à distribuição espacial da precipitação na bacia do rio Mondego, refere-se um excerto dos estudos hidrológicos que integram o projeto da barragem da Aguieira (1962):

“Na bacia do rio Mondego, as massas de ar húmido arrastadas para o interior pelos ventos vindos predominantemente de Sudoeste, ao encontrarem a linha de alturas Caramulo-Buçaco, originam precipitações abundantíssimas, da ordem dos 1500 a 2000 mm por ano. Ultrapassada aquela zona montanhosa e tendo massas de ar marítimo perdido parte da humidade de que vinham carregadas, começam as precipitações a diminuir. Fenómeno idêntico se verifica no maciço das serras da Lousã e da Estrela, embora, para igual altitude, as precipitações sejam aqui menores que na linha de alturas mais próxima ao litoral. Para Leste e Nordeste da serra da Estrela diminui rapidamente a quantidade de chuva caída, apresentando essas zonas características de maior secura e continentalidade.” (texto transcrito de EDP (2003)).

De acordo com a informação constante no PGRH4 (ARH-Centro, 2011a), caracterizam-se adicionalmente as seguintes variáveis hidrometeorológicas:

- A temperatura média anual na bacia é de cerca de 13.4°C, registando-se temperaturas médias superiores nas zonas litoral e intermédia da bacia e valores inferiores nas zonas montanhosas.
- A humidade relativa média mensal do ar oscila entre 70%, nos meses quentes, e 86%, nos meses frios.
- A evapotranspiração potencial média mensal varia entre 115,8 mm, em julho, e 19,8 mm, no mês de janeiro. A evapotranspiração potencial média anual na bacia é de cerca de 724 mm.
- A velocidade média mensal do vento na bacia do Mondego varia entre 4,9 e 18,5 km/h.

4.3.6. HIDROLOGIA

Em termos médios anuais, o escoamento superficial total gerado na bacia do Mondego é cerca de 3800 hm³. A sub-bacia do Rio Dão contribui com cerca de 817 hm³ (≈22%) e a do rio Alva com cerca de 498 hm³ (≈13%) (ARH-Centro, 2011a).

O regime hidrológico do rio Mondego é caracteristicamente torrencial, sendo, portanto, bastante irregular. A título indicativo, refere-se que, em Coimbra, a diferença entre os caudais máximos e mínimos registados é superior a 3700 m³/s (Ruas, 1936; Sanches, 1996).

De acordo com o PGRH4 (ARH-Centro, 2011a), aproximadamente 76,11% do volume de escoamento anual gerado na bacia do Mondego ocorre no semestre húmido (outubro a março) e 23,89% ocorre no semestre seco (abril a setembro) e, dentro deste último período, 8,22% é gerado no período de estiagem, que compreende os meses de junho a setembro.

Na Figura 24 representa-se a distribuição do escoamento mensal gerado na bacia do rio Mondego – na secção da foz –, em ano médio.

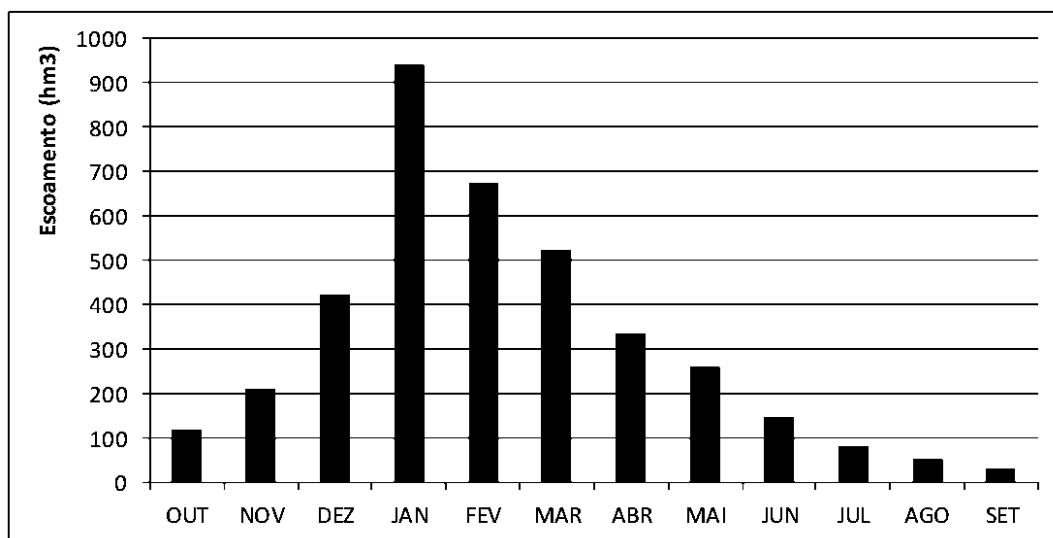


Figura 24. Escoamento médio mensal na foz bacia do rio Mondego, em ano médio (ARH-Centro, 2011a).

4.3.7. APROVEITAMENTOS HIDRÁULICOS

Nesta secção apresenta-se uma caracterização geral dos aproveitamentos hidráulicos existentes na bacia hidrográfica do rio Mondego em termos de: (i) capacidade de armazenamento de água e (ii) de produção hidroelétrica.

4.3.7.1. Capacidade de armazenamento de água

Sistema do Médio e Baixo Mondego

Os principais órgãos de armazenamento de água e de regularização de caudais existentes na bacia hidrográfica são materializados pela albufeira da Aguieira, no rio Mondego, e pela albufeira de Fronhas, no rio Alva, que se localizam na região do Médio Mondego. Estas albufeiras possuem capacidades de armazenamento de, respetivamente, 450 e 89 hm³ (EDP 2007), assegurando em conjunto a regularização dos caudais em cerca de 75% da bacia hidrográfica do rio Mondego a montante de Coimbra. Estas barragens, juntamente com a barragem da Raiva e o Açude-Ponte de Coimbra – que dispõem de reduzidas capacidades de armazenamento de água, de 24 e 1.6 hm³, respetivamente – e com as obras do empreendimento hidroagrícola do Baixo Mondego, constituem o Aproveitamento Hidráulico de Fins Múltiplos do Médio e Baixo Mondego (ou simplesmente, Sistema do Médio e Baixo Mondego), cujos principais objetivos são: i) o controlo e proteção contra as cheias na zona marginal da cidade de Coimbra e no vale do Baixo Mondego, ii) a produção de energia hidroelétrica, iii) a rega e enxugo dos campos agrícolas a jusante de Coimbra e iv) o abastecimento à indústria e às populações (EDP 2007; INAG 2001a).

Na Figura 25 apresenta-se um esquema do sistema regulado formado pelas referidas barragens e respetivas albufeiras.

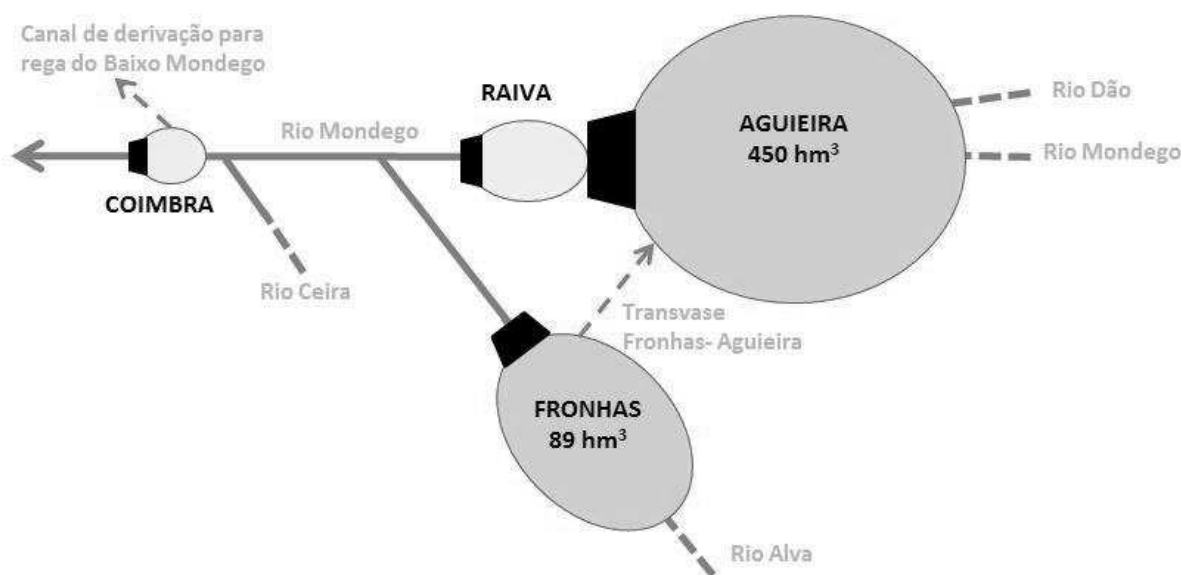


Figura 25. Esquema do Sistema do Médio e Baixo Mondego, constituído pelas albufeiras das barragens de Fronhas, Aguieira, Raiva e pelo Açude de Coimbra.

Segundo o PGHR4 (ARH-Centro, 2011a), a jusante do sistema de albufeiras Aguieira-Raiva-Fronhas, a distribuição do escoamento ao longo do ano hidrológico é significativamente alterada pelo efeito regularizador da albufeira da Aguieira, que, devido à sua grande capacidade, armazena água da estação

húmida para utilização na estação seca. No Açude-Ponte de Coimbra, o caudal afluente médio anual, em regime regularizado, é da ordem dos 97 m³/s, sendo parte deste caudal derivado para consumos urbanos, industriais e de rega.

Como se pode constatar pela informação constante no Quadro 10, a albufeira da Aguieira é, de facto, o maior reservatório de água do Sistema do Médio e Baixo Mondego – e também da bacia do Mondego (ver Quadro 12 e Quadro 11) – e aproveita os caudais da sua sub-bacia drenante, onde se inclui toda a bacia do rio Dão, bem como os caudais derivados da bacia do rio Alva através da barragem das Fronhas. A derivação de caudais da albufeira de Fronhas para a albufeira da Aguieira é realizada através de um túnel, com cerca de 8,2 km, cuja vazão de projeto é de 20 m³/s (INAG, 2001a; EDP, 2003).

Quadro 10. Barragens do Sistema do Médio e Baixo Mondego (INAG, 2001a; EDP, 2003; CNPGB, 2012; SNIRH, 2012b).

Barragem	Ano de início de exploração	Curso de Água	Área da bacia (km ²)	Volume máx. de armazenamento (hm ³)	Caudal máx. do descarregador de cheias (m ³ /s)
Aguieira	1981	Rio Mondego	3070	450	2080
Fronhas	1985	Rio Alva	644	89	500
Raiva	1981	Rio Mondego	3295	24	2000
Ponte-Açude de Coimbra	1981	Rio Mondego	4920	1,6	2000

A barragem da Raiva funciona como contraembalse da barragem da Aguieira, permitindo a modulação dos caudais descarregados e o funcionamento reversível da central hidroelétrica da Aguieira. Assim, a exploração da albufeira da Raiva está intimamente ligada às condições de exploração da barragem da Aguieira, mas é também condicionada pelas necessidades de lançamento de caudais para rega dos campos agrícolas do Baixo Mondego.

A Ponte-Açude de Coimbra, localizada imediatamente a jusante da cidade de Coimbra, recebe água proveniente da barragem da Raiva, devendo o caudal descarregado pela última ser suficiente para satisfazer todas as necessidades a jusante (cerca de 80 m³/s), designadamente para a rega dos campos agrícolas do Baixo Mondego, para a atividade industrial e para o sector doméstico e público.

O projeto desta Ponte-Açude foi concebido de forma a evitar que o nível da albufeira ultrapassasse a cota 18,8 m para caudais inferiores a 1200 m³/s, tendo sido fixada a cota de 18,0 m para o nível de exploração normal, em resultado de um compromisso entre o nível exigido pelos canais de rega e o nível que permitisse adequadas condições de drenagem da zona baixa de Coimbra (EDP, 2003).

Os descarregadores de cheia Ponte-Açude foram dimensionados para um caudal de cheia de 2000 m³/s, que é idêntico ao caudal máximo de projeto da Aguieira e da Raiva. Contudo, as afluências a Coimbra podem ser ainda acrescidas dos caudais provenientes do rio Alva, do rio Ceira e de outros afluentes intermédios menos importantes. No entanto, foi considerado em projeto que seria possível realizar uma exploração da albufeira da Aguieira, em função dos caudais no Alva e no Ceira, que em

períodos de ocorrência de cheias, garantisse um caudal máximo em Coimbra nunca superior a 2000 m³/s (EDP, 2003).

Sistema Electroprodutor da Serra da Estrela

O Sistema Electroprodutor da Serra da Estrela é um conjunto de aproveitamentos hidroelétricos em cascata, constituído por seis centrais, abastecidas por barragens e açudes, que armazenam e/ou derivam água para as centrais que se localizam a jusante. Os aproveitamentos deste sistema localizam-se na vertente oeste da Serra da Estrela, na região de cabeceira da bacia do Rio Alva (EDP, 2009). As centrais que integram este sistema hidroelétrico são, de montante para jusante: Lagoa Comprida, Sabugueiro I, Sabugueiro II, Desterro, Ponte Jugais, e Vila Cova.

As albufeiras mais importantes deste sistema, com capacidades de armazenamento de água superiores a 1 hm³, são: Lagoa comprida, Vale Rossim, Lagoacho e Covão do Meio (Quadro 11). A albufeira de Covão do Meio alimenta a de Lagoa Comprida, que por sua vez, alimenta as centrais de Lagoa Comprida e de Sabugueiro I. As albufeiras de Vale Rossim e de Lagoacho alimentam a central de Sabugueiro II. Estas quatro albufeiras totalizam um volume de armazenamento de cerca de 20,43 hm³, promovendo a regularização de grande parte dos caudais turbinados nas três centrais de montante do Sistema Electroprodutor da Serra da Estrela (EDP, 2009).

Os restantes açudes e barragens do sistema, associados a albufeiras menores, como por exemplo os açudes do Desterro, de Vila Cova ou de Ponte Jugais, têm como função a derivação dos caudais afluentes para as albufeiras de maior capacidade, estando ligadas a estas por canais e túneis (EDP, 2009).

Quadro 11. Barragens do Sistema Electroprodutor da Serra da Estrela com capacidade de armazenamento superior a 1 hm³ (INAG, 2001a; CNPGB, 2012; SNIRH, 2012b).

Barragem	Ano de início de exploração	Curso de água	Área da bacia (km ²)	Volume máx. de armazenamento (hm ³)	Caudal máx. do descarregador de cheias (m ³ /s)
Lagoa Comprida	1966	Rib ^a da Lagoa	6,4	14	92
Vale do Rossim	1956	Rib ^a da Fervença	5,4	3,50	66
Lagoacho	1993	Rib ^a do Covão do Urso	4,8	1,53	105
Covão do Meio	1953	Rib ^a da Loriga	4,8	1,40	40

Outros aproveitamentos

Para além dos aproveitamentos acima referidos, são também de destacar na bacia do rio Mondego, as barragens do Alto Ceira, Caldeirão e Fagilde, cujas capacidades de armazenamento são superiores a 1 hm³ (Quadro 12).

Quadro 12. Outras barragens existentes na bacia do rio Mondego com capacidade de armazenamento superior a 1 hm³ (INAG, 2001a; CNPGB, 2012; SNIRH, 2012b).

Barragem	Ano de início de exploração	Curso de água	Área da bacia (km ²)	Volume máx. de armazenamento (hm ³)	Caudal máx. do descarregador de cheias (m ³ /s)
Alto Ceira	1949	Rio Ceira	48	1,2	100
Caldeirão	1993	Ribeira do Caldeirão	38	5,52	242
Fagilde	1984	Rio Dão	428	2,8	515

A barragem do Alto Ceira, localizada na Serra do Açor, está integrada no aproveitamento hidroelétrico de Santa Luzia. A albufeira criada por esta barragem tem como função o armazenamento de água da bacia do rio Ceira e derivação desta para a albufeira de Santa Luzia, que se encontra situada na vertente da mesma serra que drena para a bacia hidrográfica do rio Tejo (CNPGB, 2012; SNIRH, 2012b).

A barragem do Caldeirão localiza-se na ribeira do Caldeirão, na Serra da Estrela. Esta barragem e correspondente albufeira integram um aproveitamento hidroelétrico com o mesmo nome, que inclui também um açude explorado a fio-de-água situado no rio Mondego – designado por Açude dos Trinta –, um circuito hidráulico que interliga as duas obras e uma central, que está implantada na margem direita do rio Mondego, cerca de 650 m a jusante da foz da ribeira do Caldeirão (INAG, 2001a).

Quanto à barragem de Fagilde, esta situa-se no rio Dão, concelho de Viseu. A função desta barragem é o armazenamento de água para abastecimento urbano (CNPGB, 2012; SNIRH, 2012b).

Na Figura 26 representa-se a localização das barragens acima referidas, cujas albufeiras têm uma capacidade de armazenamento superior a 1 hm³.

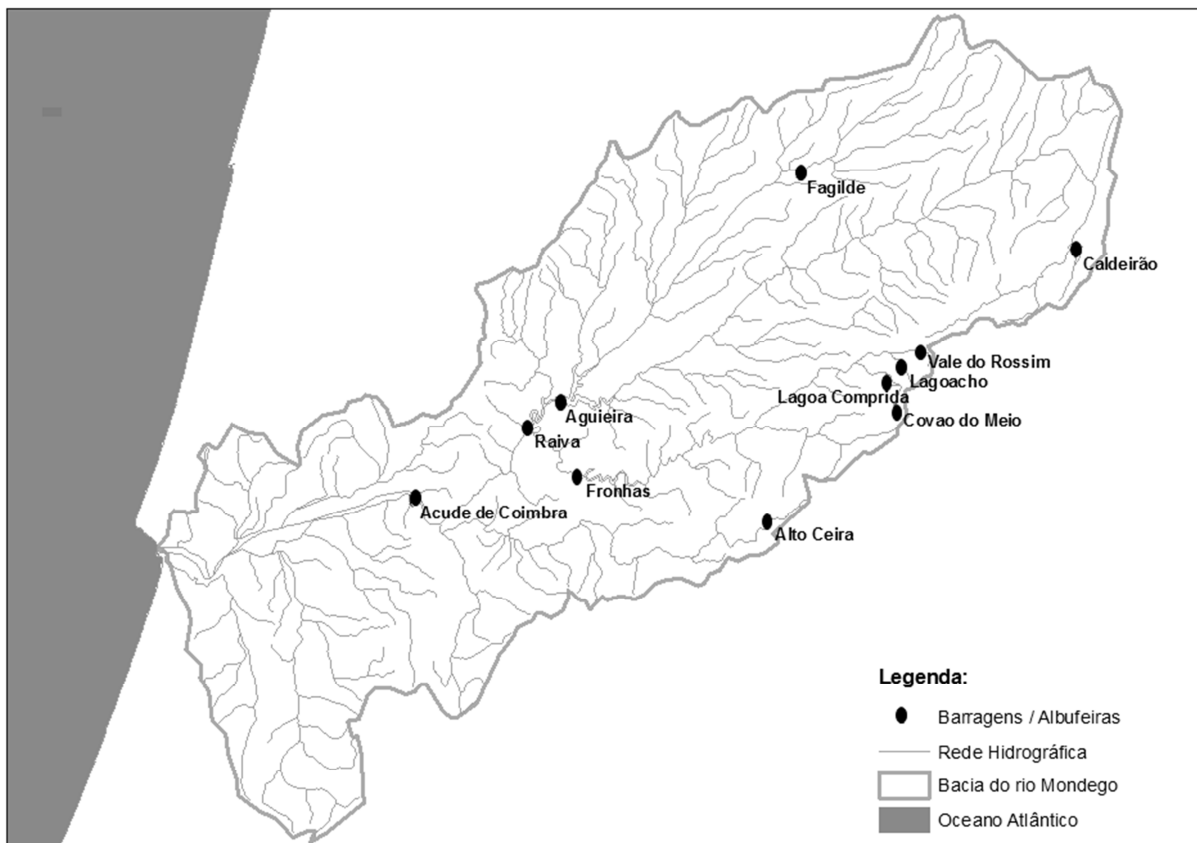


Figura 26. Localização das barragens existentes na bacia do rio Mondego, cujas albufeiras têm capacidade de armazenamento superior a 1 hm³ (adaptado de SNIRH, 2012a).

4.3.7.2. Produção hidroelétrica

A produção hidroelétrica assume um significado relevante na bacia do rio Mondego, existindo, atualmente, em termos de potência instalada, 8 aproveitamentos hidroelétricos com potências iguais ou superiores a 10 MW, e cerca de 15 aproveitamentos com potências inferiores (Quadro 13). Estes aproveitamentos totalizam na bacia uma potência instalada de cerca de 500 MW e uma produção média anual de aproximadamente 600 GWh/ano (ARH-Centro, 2011a e 2011b).

Para além dos aproveitamentos referidos, está prevista a construção do Aproveitamento Hidroelétrico de Girabolhos-Bogueira¹, no rio Mondego, concelho de Mangualde. Esta construção está integrada no Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico como um dos investimentos a realizar no horizonte 2007-2020. Este aproveitamento será constituído pelas barragens de Girabolhos e de Bogueira, sendo a segunda um contraembalse da primeira. As albufeiras criadas por cada uma

¹ A construção do Aproveitamento Hidroelétrico de Girabolhos-Bogueira foi, entretanto, cancelada, em Abril de 2016 (anteriormente à data de defesa da presente tese de doutoramento).

destas barragens terão capacidades de armazenamento da ordem de 140 hm³ e 70 hm³, respetivamente (Endesa, 2010). A potência total a instalar será de aproximadamente 365 MW, que produzirão, em média, um total de cerca de 861,7 GWh/ano. Esta produção anual dever-se-á, em grande parte, à existência de uma componente reversível muito significativa no aproveitamento, com a utilização da produção eólica excedentária em horários de vazio para armazenar água que poderá ser turbinada em horas de ponta (ARH-Centro, 2012).

Quadro 13. Aproveitamentos hidroelétricos existentes na Bacia do Rio Mondego (ARH-Centro, 2011b).

Aproveitamento Hidroelétrico	Curso de Água	Caudal max. Turbinável (m ³ /s)	Queda Bruta max. (m)	Potência Instalada (MW)	Energia Produzida (GWh/ano)
Agueira	Rio Mondego	180	71,6	336	209,9
Caldeirão	Rib ^a do Caldeirão	26	193	40	48,7
Raiva	Rio Mondego	80	12,0	24	44,9
Vila Cova	Rio Alva	5,35	240	23,4	64,0
Ponte de Jugais	Rio Alva	10,05	234,7	19,2	57,0
Sabugueiro I	Rib ^a da Lagoa	1,98	593	13,2	48,0
Desterro	Rio Alva	8,73	171	12,6	40,0
Sabugueiro II	Rib ^a Covão do Urso	2,74	442	10	28,0
Penacova	Rio Mondego	150,0	10,1	9,300	23,70
Ponte Fagilde	Rio Dão	4,10	33,9	3,200	8,85
Avô	Rio Alva	28,0	7,0	0,920	3,54
Fronhas	Rio Alva	2,00	48,5	0,900	4,39
Rei dos Moinhos	Rio Alva	15,60	6,0	0,800	2,20
Moinhos	Rio do Castelo	2,30	80,0	0,650	2,80
Casal do Ermio	Rio Ceira	8,50	9,5	0,650	2,13
Lagoa Comprida	Rib ^a da Lagoa	2,64	28,0	0,632	1,68
Monte Redondo	Rio Ceira	5,60	13,0	0,525	2,30
Pateiro	Rio Mondego	1,92	50,0	0,336	0,10
Ermida	Rib ^a de S. João	1,02	96,0	0,308	0,90
Múceres	Rib ^a de Múceres	1,98	140,0	0,250	0,44
Figueiral	Rio Carvalhinho	0,50	220,0	0,160	0,60
Pisões	Rio Dão	29,0	5,5	0,132	0,50
Pisões	Rio Dinha	0,50	14,0	0,096	0,30

4.4. SISTEMA REGULADO AGUIEIRA-RAIVA-FRONHAS

O Sistema Aguieira-Raiva-Fronhas consiste num sistema de albufeiras interligadas, – constituído pelas albufeiras com esses nomes (ver Figura 25) –, que integra o Sistema do Médio e Baixo Mondego, já descrito de uma forma geral na secção anterior (4.3.7.1).

Nesta secção apresenta-se, em primeiro lugar, uma caracterização mais detalhada destas três albufeiras e dos seus órgãos de descarga, e seguidamente são descritas as regras de exploração deste sistema.

4.4.1. CARACTERÍSTICAS DAS ALBUFEIRAS E DOS SEUS ÓRGÃOS DE DESCARGA

Como referido na secção 4.3.7.1 e exposto no Quadro 10, os principais órgãos de armazenamento de água e de regularização de caudais existentes na bacia hidrográfica do Mondego são materializados pelas albufeiras da Aguieira e de Fronhas, que asseguram em conjunto a regularização dos caudais em cerca de 75% da bacia hidrográfica do rio Mondego a montante de Coimbra.

4.4.1.1. Albufeira da Aguieira

A albufeira da Aguieira tem uma capacidade total de armazenamento de 450 hm³ e inunda uma área de aproximadamente 2000 ha a montante da sua barragem, que se localiza no rio Mondego a aproximadamente 2 km a jusante da foz do rio Dão e a 35 km a montante da cidade de Coimbra.

Na secção de implantação da barragem, a área de drenagem é de aproximadamente 3070 km².

Na Figura 27, apresenta-se a curva de capacidades da albufeira da Aguieira, ou seja, a curva que relaciona a cota de água na albufeira com o volume armazenado.

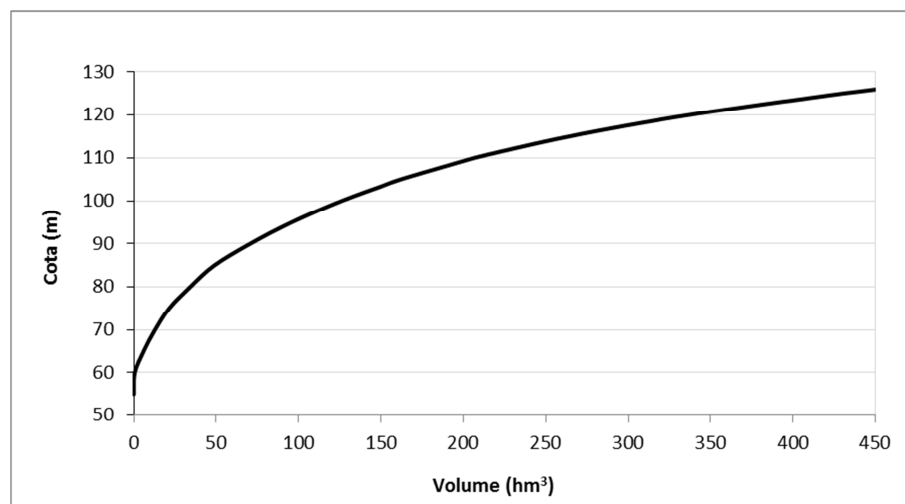


Figura 27. Curva de capacidades da albufeira da Aguieira (EDP, 2007).

A barragem da Aguieira é em betão, do tipo de abóbadas múltiplas, tem uma altura de 89 m acima da fundação e o coroamento, localizado à cota 126,65 m, tem um desenvolvimento de 400 m. Como órgãos de descarga e segurança, a barragem dispõe de:

- 2 descarregadores de cheias iguais, implantados nos contrafortes frontais da barragem, com soleiras à cota 111,00 m. Na Figura 28 apresenta-se a curva de vazão de cada um dos descarregadores de cheias. Ambos são controlados por comportas, permitindo descarregar, no total, um caudal máximo de 2080 m³/s.
- 1 descarregador de fundo localizado na encosta da margem direita, que permite escoar um caudal máximo de 125 m³/s. Este órgão de descarga não é, por norma, utilizado na gestão operacional da albufeira.

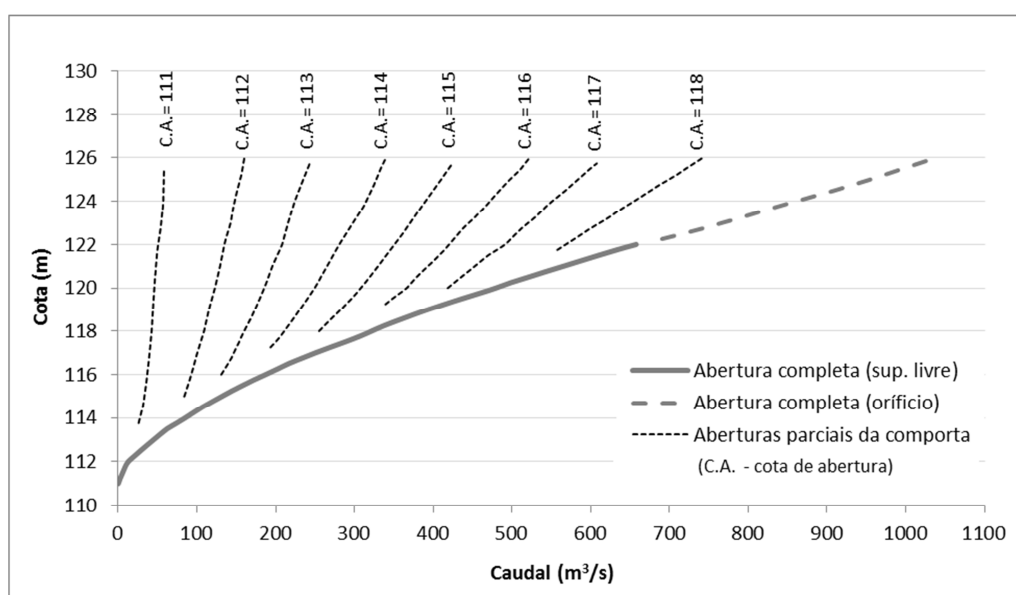


Figura 28. Curva de vazão de cada um dos descarregadores de cheias da barragem da Aguieira (EDP, 2007).

A barragem dispõe ainda de um circuito hidráulico que lança os caudais turbinados no rio Mondego, imediatamente a jusante da barragem, permitindo, assim, abastecer 3 grupos geradores reversíveis (turbinas-bombas) que funcionam numa central localizada junto à barragem. Para níveis normais de exploração da albufeira, os três grupos turbinam um caudal de 450 m³/s. Com a albufeira à cota máxima, correspondente ao Nível de Máxima Cheia (NMC) – 126,0 m – o caudal turbinado poderá atingir o valor de 525 m³/s.

Esta albufeira tem como funções principais a produção de energia hidroelétrica, o abastecimento de água para rega e o controlo de cheias, estando em exploração desde 1981 (EDP, 2007).

4.4.1.2. Albufeira da Raiva

A albufeira da Raiva tem uma capacidade total de armazenamento de 24 hm³ e inunda uma área de aproximadamente 230 ha a montante da sua barragem, que se localiza no rio Mondego a aproximadamente 10 km a jusante da barragem da Aguieira, funcionando como contraembalse desta.

Na secção de implantação da barragem a área de drenagem é de aproximadamente 3295 km².

Na Figura 29 apresenta-se a curva de capacidades da albufeira da Raiva.

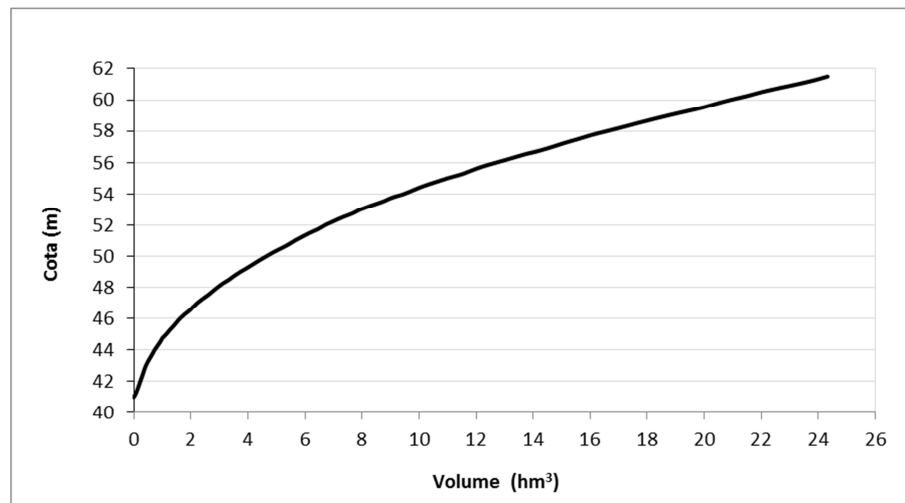


Figura 29. Curva de capacidades da albufeira da Raiva (EDP, 2007).

A barragem da Raiva é também em betão, mas do tipo gravidade, tem uma altura de 36 m acima da fundação e o coroamento, localizado à cota 64,5 m, tem um desenvolvimento de 200 m. Como órgãos de descarga e segurança, a barragem dispõe de:

- 1 descarregador de cheias sobre a barragem constituído por uma soleira normal, com crista à cota 52,0 m controlada por comportas com bordo à cota 62,0 m. Na Figura 30 apresenta-se a curva de vazão desse descarregador de cheias, que como se pode observar, permite descarregar um caudal máximo de cerca de 2100 m³/s.
- 1 descarregador de fundo localizado no corpo da barragem, que permite escoar um caudal máximo de aproximadamente 44,5 m³/s. Este órgão de descarga também não é, por norma, utilizado na gestão operacional da albufeira.

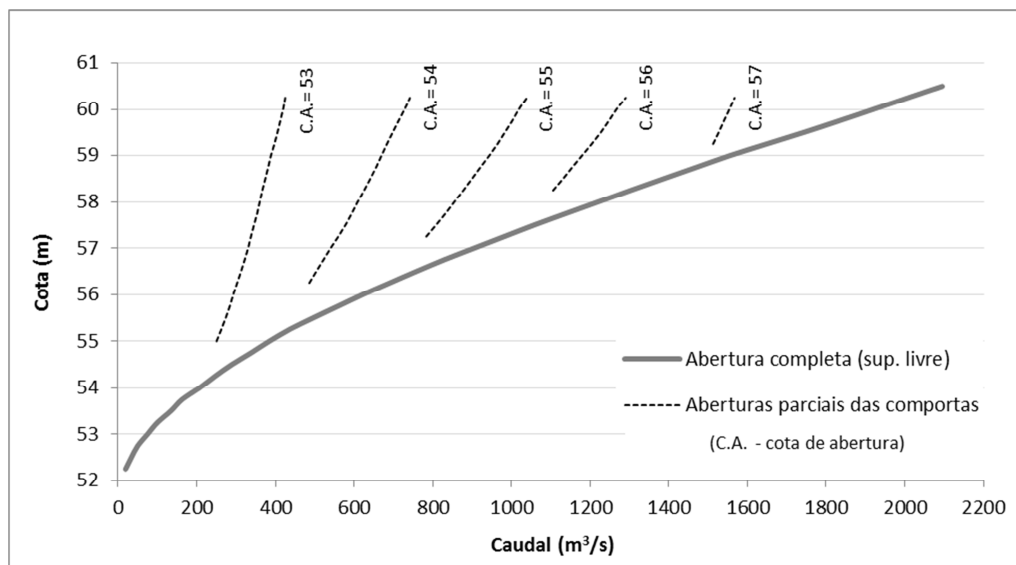


Figura 30. Curva de vazão do descarregador de cheias da barragem da Raiva (EDP, 2007).

A barragem dispõe ainda de um circuito hidráulico que abastece 2 turbinas Bolbo que funcionam numa central localizada junto à barragem, lançando também os caudais turbinados no rio Mondego, imediatamente a jusante desta barragem. Para níveis normais de exploração da albufeira, os dois grupos geradores turbinam um caudal de $160 \text{ m}^3/\text{s}$.

Esta albufeira foi construída para permitir o funcionamento reversível da central hidroelétrica da Aguieira e para modular os caudais efluentes dessa albufeira. Assim, a exploração da albufeira da Raiva está intimamente ligada às condições de exploração da barragem da Aguieira, mas é também condicionada pelas necessidades de lançamento de caudais para rega dos campos agrícolas do Baixo Mondego. Além destas funções, e como já referido, a albufeira da Raiva produz energia hidroelétrica, estando em exploração desde 1981 (EDP, 2007).

4.4.1.3. Albufeira de Fronhas

A albufeira de Fronhas tem uma capacidade total de armazenamento de 89 hm^3 e inunda uma área de aproximadamente 535 ha a montante da sua barragem, que se localiza no rio Alva, dominando uma área de aproximadamente 644 km^2 .

Na Figura 31 apresenta-se a curva de capacidades da albufeira de Fronhas.

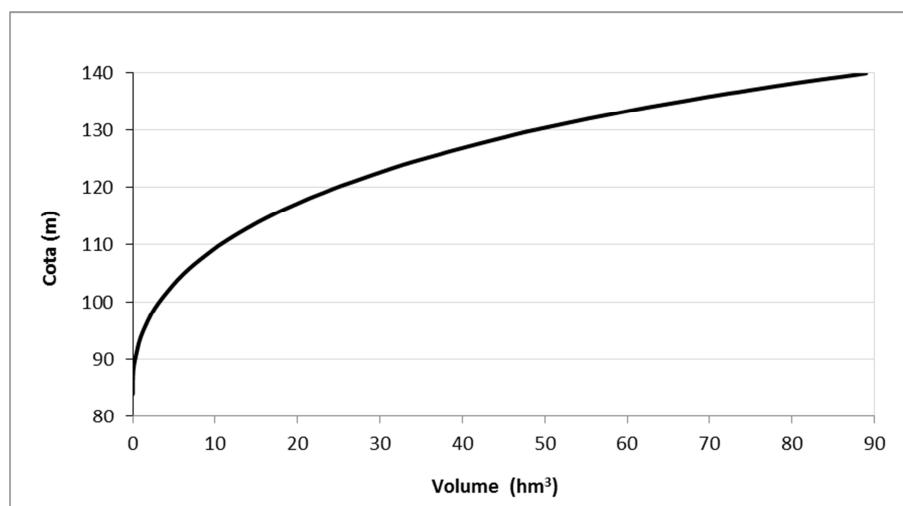


Figura 31. Curva de capacidades da albufeira de Fronhas (EDP, 2007).

A barragem da Fronhas é também em betão, do tipo arco de dupla curvatura, tem uma altura de 62 m acima da fundação e o coroamento, localizado à cota 140,0 m, tem um desenvolvimento de 250 m. Como órgãos de descarga e segurança, a barragem dispõe no seu corpo de 4 orifícios com comportas, dimensionados para debitar, cada um, um caudal de 125 m³/s para uma cota de água na albufeira de 130,5 m. Estes órgãos correspondem a:

- 2 descarregadores de fundo, com o eixo do orifício à cota 92,5 m;
- 2 descarregadores de meio fundo, com o eixo do orifício à cota 100,0 m.

Na Figura 32 apresentam-se as curvas de vazão dos descarregadores de cheias da barragem de Fronhas, numa situação em que as comportas estejam totalmente abertas.

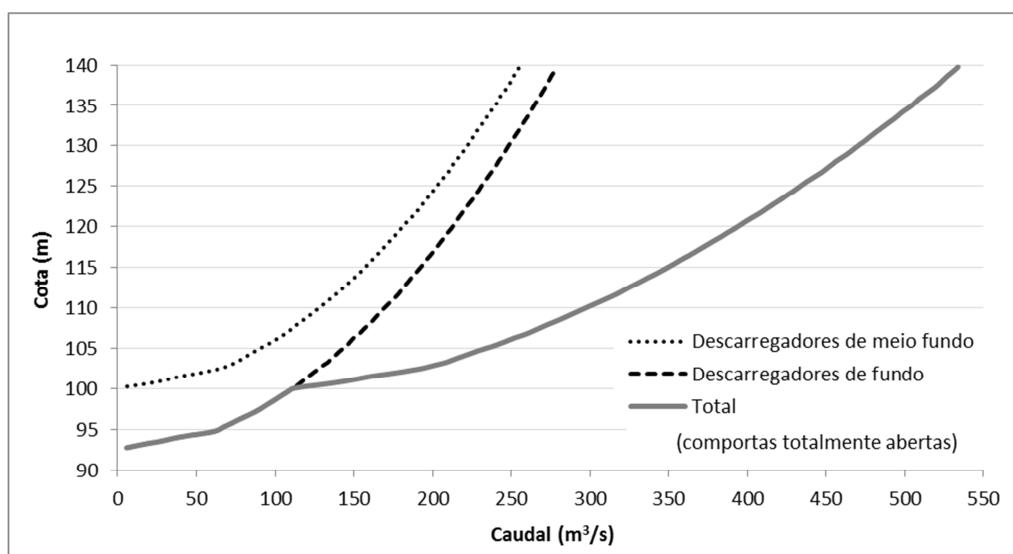


Figura 32. Curvas de vazão dos descarregadores de cheias da barragem de Fronhas (EDP, 2007).

A albufeira de Fronhas possui um túnel de derivação de água para a albufeira da Aguieira, que permite aumentar o potencial hidroelétrico das albufeiras da Aguieira e da Raiva. Este túnel tem um comprimento de cerca de 8,2 km e uma secção transversal corrente do tipo ferradura – com um diâmetro característico de 3,50 m na zona revestida – dimensionada para transportar um caudal de 20 m³/s, sendo a sua capacidade real máxima de vazão de cerca de 30 m³/s. As bocas de entrada e de saída estão equipadas com comportas e as suas soleiras estão às cotas 117,0 e 112,0 m, respetivamente.

4.4.2. REGRAS DE EXPLORAÇÃO

As regras de exploração do sistema Aguieira-Raiva-Fronhas foram definidas pela EDP, que é a entidade que gere o sistema, e aprovadas pela APA, como autoridade responsável nesta matéria. O objetivo da definição destas regras consistiu em criar um procedimento que garantisse, da forma mais eficiente possível, o cumprimento do compromisso entre o controlo das cheias e as necessidades para as outras utilizações, em especial para a rega e para a produção de energia elétrica.

Contudo, devido à importância dessas utilizações e à vulnerabilidade das localidades existentes a jusante do sistema aos efeitos das cheias, a gestão operacional do sistema não segue de forma automática as regras de exploração definidas pela EDP. A gestão operacional do sistema é realizada sempre em articulação com a APA, a quem compete fornecer ao longo do tempo as indicações que considera mais adequadas, face ao cenário hidrológico corrente e prospetivado, para assegurar as várias utilizações do sistema (EDP, 2007).

4.4.2.1. Antecedentes

Ao longo dos anos foram realizados vários estudos que resultaram na definição e implementação de diferentes regras de exploração para este sistema regulado, tendo em conta o compromisso de, por um lado, manter um nível de água nas albufeiras suficientemente elevado para produzir energia e para garantir o abastecimento às diferentes utilizações, e por outro lado, garantir um nível de água suficientemente baixo para manter um “volume de encaixe” disponível para regularização de cheias (EDP, 2007).

Todas as regras propostas e revistas ao longo do tempo, incluindo as atualmente em vigor, definem um procedimento de atuação diferente consoante o período do ano.

Entre 1981 e 1987, os procedimentos consistiam essencialmente na imposição de um Nível Máximo de Exploração (NME) – também designado por Nível de Pleno Armazenamento (NPA) ou Nível de Defesa contra Cheias em Coimbra (NDC) – das albufeiras em função da época do ano, sendo esse nível maior no período de estiagem e menor no período húmido.

Em 1988, devido à penalização da produção hidroelétrica causada pela imposição de um nível muito baixo de exploração durante os vários meses húmidos, foi proposto um novo procedimento de exploração para a barragem da Aguieira denominado de “Gestão Adaptativa”, que estabeleceu que durante o período considerado de maior probabilidade de ocorrência de cheias na bacia, de 15 de

outubro a 15 de abril, o nível de água a atingir nesta albufeira deverá depender do caudal médio afluente nas 24 horas anteriores. Neste contexto, foram fixados valores do NME para a albufeira da Aguieira, a garantir diariamente durante o período referido, para vários intervalos de valores do caudal médio afluente no dia anterior (Quadro 14). Com esta proposta fixou-se também a cota 125,2 m como Nível de Defesa de Obra (NDO), que corresponde a ter uma capacidade de encaixe de 130,8 hm³ entre essa cota e o maior valor do NME. Essa capacidade na albufeira (volume disponível entre o NME e o NDO) destina-se a limitar o caudal afluente a Coimbra ao valor de cerca de 1200 m³/s, aquando da ocorrência de cheias com período de retorno inferior a 100 anos. A capacidade disponível entre o NDO e o NMC destina-se ao amortecimento de cheias de maior magnitude.

Fora do referido período, estabeleceu-se um NME constante, igual a 124,70 m.

Quadro 14. Critérios para a gestão da albufeira da Aguieira definidos em 1988, para o período de 15 de outubro a 15 de abril (“Gestão Adaptativa”) (EDP, 2007) – aplicados com as regras “R2007” (ver 4.4.2.2).

Caudal médio no dia t-1 (m ³ /s)	NME no dia t (m)
0 - 25	124,45
25 - 50	123,90
50 - 100	121,40
100 - 150	119,35
mais de 150	117,85

4.4.2.2. Situação vigente

Em 2007, foi realizada uma nova revisão das regras de exploração (EDP 2007), que propôs manter o critério antecedente da “Gestão Adaptativa”, mas com algumas alterações nos valores anteriormente definidos. No entanto, e apesar do tempo decorrido desde então, e segundo informações fornecidas pela EDP em reunião havida no dia 11 de dezembro de 2015, as referidas alterações apenas começaram a ser aplicadas, em termos operacionais, no ano hidrológico 2015/2016. No entanto, não foi indicada a data em que essas novas regras de exploração foram aprovadas e em que entraram oficialmente em vigor.

Por esse motivo, na presente dissertação foram considerados e analisados dois conjuntos de regras de exploração do sistema Aguieira-Raiva-Fronhas:

- as regras que estavam em vigor em 2007 e que perduraram até ao final do ano hidrológico 2014/2015, doravante designadas por “**R2007**”;
- as regras que foram propostas pela EDP em 2007 (EDP, 2007) e entraram em vigor no ano hidrológico de 2015/2016, doravante designadas “**R2007+**”;

Seguidamente, no Quadro 15 e no Quadro 16, apresentam-se os resumos das principais regras de exploração para cada albufeira do sistema, para esses dois conjuntos de regras, no período de 15 de outubro a 15 de abril.

Quadro 15. Regras de exploração do sistema Aguieira-Raiva-Fronhas em vigor em 2007 ("R2007"), para o período de 15 de outubro a 15 de abril.

<p>Albufeira de Fronhas:</p> <p>Níveis-chave definidos:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ NmE = 117.0 m (Nível Mínimo de Exploração)▪ NDC = 120,0 m (Nível de defesa contra cheias em Coimbra)▪ NDO1 = 130,5 m e NOD2 = 136,6 m <p>Procedimento:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Abrir as duas comportas de fundo, quando é atingido o NDO1▪ Abrir as duas comportas de meio-fundo, quando é atingido o NDO2▪ Manter o transvase Fronhas-Aguieira sempre aberto, exceto se o nível de água na Aguieira for superior ao de Fronhas (não é permitido o escoamento em sentido contrário)
<p>Albufeira da Aguieira:</p> <p>Níveis-chave definidos:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ O NME é definido diariamente, em função do caudal médio afluente nas 24 horas anteriores, de acordo com os critérios apresentados no Quadro 14.▪ NDO = 123,0 m <p>Procedimento:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ <u>Se o nível for inferior a 119:</u> permite-se oscilação de níveis por razões energéticas. O lançamento de caudais deverá ser feito apenas pelas turbinas.▪ <u>Se o nível estiver entre 119 e 123:</u> o caudal mínimo a lançar é 150 m³/s. O caudal máximo é 450 m³/s ou igual ao complemento para 1200 m³/s em Coimbra. O lançamento de caudais deverá ser feito, de preferência, pelo circuito hidráulico das turbinas.▪ <u>Se o nível for superior a 123:</u> O caudal lançado será incrementado de 350 m³/s por hora, até à abertura completa dos descarregadores de superfície ou até que o nível estabilize. Quando o nível tiver tendência a baixar, o caudal lançado passará a ser igual ao caudal afluente, se este for superior a 600 m³/s, ou igual a 600 m³/s, no caso contrário.
<p>Albufeira da Raiva:</p> <p>Níveis-chave definidos:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ NME = NMC = 61,5 m <p>Procedimento:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ O caudal lançado para jusante terá as mesmas limitações de valores mínimos e máximos indicados para a Aguieira. Contudo, se se verificar uma tendência para a cota subir, deverá lançar-se para jusante um caudal igual ao afluente total à Raiva.

Quadro 16. Regras de exploração do sistema Aguieira-Raiva-Fronhas propostas pela EDP em 2007 ("R2007+"), para o período de 15 de outubro a 15 de abril.

<p>Fronhas:</p> <p>Níveis-chave definidos:</p> <ul style="list-style-type: none"> NmE = 117,0 m NDC = 123,0 m NDO1 = 130,5 m e NOD2 = 136,6 <p>Procedimento:</p> <ul style="list-style-type: none"> No início de uma cheia o nível da albufeira deve encontrar-se à cota 123,0 m; <u>Nível igual ou superior a 130,5</u>: abrir totalmente as comportas das duas descargas de fundo, as quais só devem fechar quando o nível regressar à cota 123,0 m; <u>Nível igual ou superior a 136,5</u>: abrir totalmente as comportas das duas descargas de meio fundo, as quais só devem fechar quando o nível regressar à cota 130,5 m; Manter o transvase Fronhas-Aguieira sempre aberto, exceto se o nível de água na Aguieira for superior ao de Fronhas (não é permitido o escoamento em sentido contrário)
<p>Aguieira:</p> <p>Níveis-chave definidos:</p> <ul style="list-style-type: none"> O NME é definido diariamente, em função do caudal médio afluente nas 24 horas anteriores, de acordo com os seguintes critérios apresentados no Quadro 17. NDO = 125,0 m <p>Procedimento:</p> <ul style="list-style-type: none"> No início de uma cheia o nível da albufeira deve encontrar-se à cota 117,0 m <u>Nível inferior ou igual a 125</u>: o caudal lançado para jusante deverá ser igual a 450 m³/s, preferencialmente através de turbinamentos; <u>Nível superior a 125</u>: quando o nível ultrapassar a cota 125,0 m, inicia-se a abertura das comportas dos descarregadores de cheia, de modo a que as mesmas estejam totalmente abertas quando for atingida a cota 125,5 m.
<p>Raiva:</p> <p>Níveis-chave definidos:</p> <ul style="list-style-type: none"> NME deve situar-se entre as cotas 60,0 e 61,5 m <p>Procedimento:</p> <ul style="list-style-type: none"> Em situação de cheia, deverá ser mantido o NME até esgotar a capacidade de vazão dos descarregadores de cheia para essa cota.

Quadro 17. Critérios para a gestão da albufeira da Aguieira definidos em 2007, para o período de 15 de outubro a 15 de abril (EDP, 2007) – aplicados com as regras "R2007+"..

Caudal médio no dia t-1 (m ³ /s)	NME no dia t (m)
0 - 25	123,0
25 - 50	121,0
50 - 100	119,0
Mais de 100	117,0

4.5. CARACTERIZAÇÃO DAS CHEIAS NO RIO MONDEGO

De acordo com o descrito por Sanches (1996) e Silva (2006), as cheias no rio Mondego foram, durante muitos séculos, um fator condicionador da ação humana nas suas margens. De facto, o vale aluvionar do Baixo Mondego foi, com frequência, atingido por cheias que causaram grandes estragos para as populações agrícolas, como sejam: o galgamento e rotura de diques, a inundação de campos e destruição de culturas, a inundação de habitações e de vias de comunicação, a deposição de sedimentos, etc. A cidade de Coimbra, pela sua localização e importância sociocultural, foi também, ao longo dos tempos, um ponto de referência marcante no registo das cheias do Mondego. Por essa razão, a defesa da cidade de Coimbra e dos campos agrícolas localizados na zona do Baixo Mondego mereceram, desde datas muito antigas, cuidados continuados.

4.5.1. ZONAS INUNDÁVEIS

Em termos de zonas inundáveis, destaca-se a região do Baixo Mondego que é uma região predominantemente agrícola e com elevado potencial produtivo, constituída por terrenos muito férteis, e que, durante séculos, esteve fortemente condicionada pela ocorrência de cheias frequentes e por uma drenagem agrícola ineficaz.

Na tentativa de ultrapassar esses constrangimentos, foram realizados ao longo do tempo vários estudos para a regularização do rio e controlo das cheias (Sanches, 1996). O projeto mais recente, já em implementação e com êxito, trata-se do já referido Aproveitamento Hidráulico do Baixo e Médio Mondego (descrito em 4.3.7.1). Antes da sua implementação, a capacidade de transporte do rio Mondego não excedia $280 \text{ m}^3/\text{s}$ – valor ao qual corresponde um período de retorno muito baixo – pelo que ocorriam inundações quase anualmente. Tal situação já não se verifica atualmente (INAG, 2001a).

Contudo, por não terem sido ainda regularizados os afluentes do Mondego a jusante de Coimbra, nomeadamente o Arunca e o Pranto, os vales inferiores destes cursos de água são frequentemente castigados pelas cheias, não só as geradas nas suas bacias, mas também pela sobreposição do efeito da elevação do nível de água no rio Mondego.

Em relação às áreas urbanas com maior risco de inundação – por haver registos de terem sido atingidas pelas cheias no passado –, assinalam-se as povoações de Coimbra, de Montemor-o-Velho e de Soure, situadas a cotas mais baixas. No concelho de Montemor-o-Velho, destacam-se as localidades de Ereira, localizada em pleno leito de cheia, na margem direita do Mondego, e as localidades de Pereira, Santo Varão e Formoselha, na margem esquerda (Silva, 2006).

O Plano de Gestão da Região Hidrográfica 4 (ARH-Centro, 2011a) assinala na bacia do Mondego, as seguintes áreas como as zonas urbanas de risco de inundação associado a cheias naturais:

- margens do rio Mondego entre Coimbra e Figueira da Foz;
- margens do rio Arunca entre Soure e a confluência com o rio Mondego;
- margens do rio Pranto entre Casal da Rola e a confluência com o rio Mondego;
- margens do rio de Foja entre Santana e a confluência com o rio Mondego;

- zona urbana de Pombal, na confluência do ribeiro do Vale com o rio Arunca.

Com a construção das barragens da Aguieira e de Fronhas – concluídas respetivamente em 1981 e 1982 – bem como com a regularização fluvial realizada no Baixo Mondego, foi possível passar a controlar a maior parte das cheias, e por consequência, reduziu-se o risco de inundação das localidades marginais ao rio Mondego (Silva, 2006; Santos *et al.*, 2013). Contudo, ainda assim, algumas das zonas acima identificadas foram inundadas em cheias havidas na bacia posteriormente, como se mostra no ponto seguinte (ver 4.5.2). Isto deve-se em grande parte às aflúências das sub-bacias não regularizadas a jusante das referidas barragens, como é o caso da bacia do rio Ceira, cujas aflúências podem ser bastante significativas, ou mesmo suficientes, para provocar inundações nas margens do Mondego, nomeadamente na zona ribeirinha de Coimbra. Por outro lado, a gestão das albufeiras nem sempre é eficaz no controlo das cheias, devido à necessidade de garantir de níveis elevados nas albufeiras para as utilizações consumptivas (nomeadamente para a rega da área do Baixo Mondego) e à inexistência de um sistema de previsão de aflúências de médio alcance que permita adotar medidas preventivas, baixando os níveis das albufeiras no caso de se preverem caudais significativos nos dias seguintes.

Além disso, a perceção humana das cheias fluviais, especialmente na cidade de Coimbra, foi amplificada pela urbanização das áreas marginais ao rio, uma vez que aumentaram os impactos socioeconómicos nas áreas inundadas por caudais de cheias relativamente frequentes (com tempo de retorno inferiores a 5 anos). Este fator, por sua vez, veio condicionar também a exploração das albufeiras a montante e a sua operacionalidade na proteção de cheias de maior dimensão, na medida em que, em determinadas situações, no sentido de impedir a ocorrência de inundações menos significativas, os responsáveis pela gestão das albufeiras reduzem – em função das aflúências das sub-bacias não regularizadas – as descargas de água, armazenando-a, diminuindo assim, no entanto, a capacidade de encaixe de caudais de cheia de maior magnitude.

No âmbito do Programa Polis Coimbra, iniciado em 2001, foi realizado o mapeamento das inundações na zona ribeirinha de Coimbra, numa extensão compreendida entre a Ponte de Santa Clara e a Ponte Rainha Santa Isabel, anteriormente denominada por Ponte Europa. Os trabalhos de Marques *et al.* (2005) e Santos *et al.*, (2013) apresentam os resultados desse mapeamento.

Em resposta às exigências da Diretiva Inundações (Diretiva 2007/60/CE) – transposta para o direito nacional pelo Decreto-lei n.º 115/2010 de 22 outubro – foi promovida pela APA a “Elaboração da cartografia específica sobre o risco de inundação para Portugal Continental” (APA, 2014), onde se inclui também a demarcação das zonas inundáveis e ainda as cartas de risco de inundação, para vários tempos de retorno, em duas zonas da bacia do Mondego classificadas como críticas em termos de cheias fluviais: a zona ribeirinha da cidade de Coimbra e a zona do estuário do rio Mondego. Os resultados georreferenciados desse trabalho podem ser visualizados numa aplicação web disponível através do SNIRH (SNIRH, 2015).

4.5.2. REGISTOS DE CHEIAS OCORRIDAS

Em relação a registos de cheias ocorridas, Sanches (1996) refere a ocorrência de cheias extraordinárias ou memoráveis do rio Mondego em Coimbra, nos seguintes anos: 1788, 1804, 1821, 1842, 1852,

1860, 1872 (janeiro), 1876 (dezembro), 1878 (dezembro), 1900 (fevereiro), 1902 (fevereiro), 1909 (dezembro), 1915 (janeiro), 1924 (março), 1927 (dezembro), 1948 (janeiro), 1955 (janeiro), 1956 (março) e 1960 (outubro).

O mesmo autor (Sanches, 1996) menciona também as cheias que ocorreram no inverno de 1935-1936, descritas em pormenor pelo Eng^o. Henrique Ruas (Ruas, 1936). Esse ano hidrológico iniciou-se com uma época extremamente chuvosa, tendo havido uma situação de cheia quase permanente, que se prolongou desde o início de novembro até abril seguinte.

Na publicação de Sanches (1996) é referido ainda que a cheia de janeiro de 1948 foi considerada, até essa data, a cheia registada de maior valor de ponta do rio Mondego e nos afluentes Dão, Alva e Ceira, tendo-se verificado, em Coimbra, um caudal de 4140 m³/s (Figura 33). Segundo esse autor, o caudal ocorrido naquele evento atingiu um valor próximo da cheia centenária.

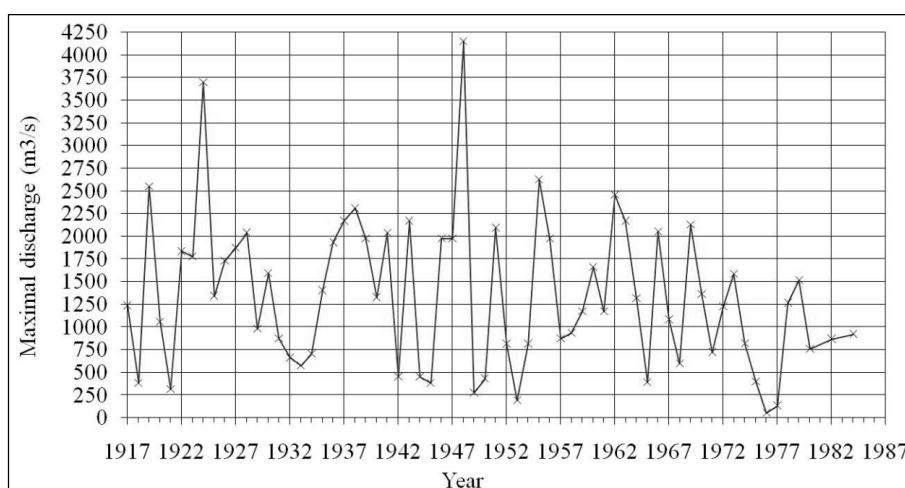


Figura 33. Caudais instantâneos máximos registados na Ponte de Santa Clara em Coimbra nos anos representados, entre 1917 e 1984 (Marques e Pina, 2013).

Silva (2006) documenta também as cheias de fevereiro-março de 1978, como tendo sido consideradas as últimas cheias do Mondego ocorridas em regime natural, ou seja, antes da regularização de caudais realizada pelas albufeiras da Aguieira e de Fronhas. Estas cheias foram ocasionadas por chuvas que se prolongaram por várias semanas, afetando várias regiões de Portugal Continental.

Após a regularização do Mondego, as cheias ocorridas no inverno de 2000/2001 vieram contrariar a ideia de que o problema das cheias no Baixo Mondego teria acabado com a construção das barragens a montante. Como relata Silva (2006), nesse inverno foram registados, em dois meses, três situações de cheia. A primeira ocorrência registou-se a 6 e 7 de dezembro, a segunda no dia 7 de janeiro e, a terceira cheia a 26 e 27 desse mesmo mês. Silva (2006) descreve a situação de crise que as populações ribeirinhas do Baixo Mondego viveram durante esses episódios, com o rompimento do sistema de diques que limita o leito do rio e a inundação de várias localidades marginais (Figura 34). De modo a tentar explicar o que levou à ocorrência do evento de 26 e 27 de janeiro de 2001, Rodrigues *et al.*

(2001) avaliaram e demonstraram a excepcionalidade dos fenómenos que estiveram na génese dessa cheia – através da precipitação e escoamento verificado –, e descrevem o funcionamento dos mecanismos de vigilância e alerta que foram utilizados durante esse evento.



Figura 34. Fotografias das inundações em Coimbra (em cima) e no vale do Baixo Mondego, na cheia de 26 e 27 de janeiro 2001 (SNIRH, 2014).

Após o inverno de 2000/2001, já ocorreram outras situações de cheia no rio Mondego com a inundação da zona ribeirinha da cidade de Coimbra. No entanto, nenhum desses eventos posteriores teve impactos tão gravosos como o ocorrido no final de janeiro de 2001.

Nas Figuras 35 a 40 apresentam-se várias fotografias que evidenciam algumas das situações mais recentes, em que o rio Mondego inundou a zona marginal de Coimbra. Estas fotografias dizem respeito às situações de cheia ocorridas nomeadamente a: 30 de janeiro de 2009 (Figura 35); 19 de janeiro de 2013 (Figura 36); 30 de março de 2013 (Figura 37); 3 de janeiro de 2014 (Figura 38); 10 de fevereiro de 2014 (Figura 39) e 11 de janeiro de 2016 (Figura 40).



Figura 35. Fotografia das inundações em Coimbra na cheia de 30 de janeiro 2009 (Marques e Pina, 2013).



Figura 36. Fotografias das inundações em Coimbra na cheia de 19 de janeiro de 2013: à esquerda, uma esplanada inundada no Parque Mondego e à direita, a ponte pedonal da Praia Fluvial de Torres do Mondego arrastada pela corrente do rio (Um Pingo de Luz, 2013a e 2013b).



Figura 37. Fotografias das inundações ocorridas na zona ribeirinha da cidade de Coimbra (Parque Mondego) na cheia de 30 de março de 2013 (Um Pingo de Luz, 2013c).

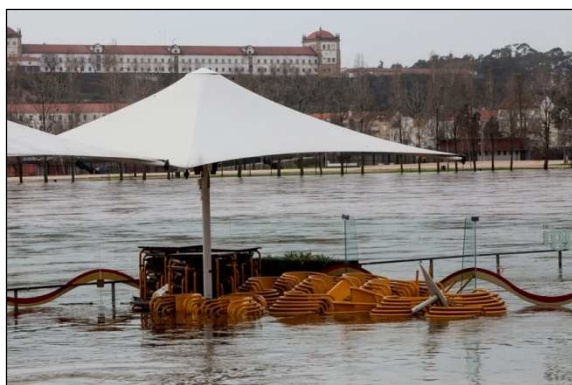


Figura 38. Fotografias das inundações ocorridas na zona ribeirinha da cidade de Coimbra (Parque Mondego) na cheia de 3 de janeiro de 2014 (Público, 2014).



Figura 39. Fotografias das inundações ocorridas na zona ribeirinha da cidade de Coimbra (Parque Mondego) na cheia de 10 de fevereiro de 2014 (Coimbra Canal, 2014).



Figura 40. Fotografias das inundações ocorridas na zona ribeirinha da cidade de Coimbra (Parque Mondego à esquerda e Mosteiro de Santa Clara à direita) na cheia de 11 de janeiro de 2016 (Coimbra Canal, 2014).

4.5.3. ESTIMATIVAS DOS CAUDAIS DE CHEIA EM REGIME NATURAL

Para determinação dos caudais de cheia num dado ponto de uma rede hidrográfica para vários períodos de retorno existe um grande número de técnicas e métodos distintos, nomeadamente empíricos, estatísticos e baseados em modelos de simulação hidrológica. A aplicação desses métodos

depende sobretudo do objetivo do estudo, das características da bacia e da rede hidrográfica e da qualidade e da quantidade de dados disponíveis (EDP, 2003). Contudo, como em muitas situações a opção por um método em detrimento de outros pode não ser consensual, é comum aplicar-se mais que um método para estimar os valores dos caudais de cheia. Estas estimativas são normalmente revistas ao longo do tempo, quando se verifica um aumento significativo dos dados de base disponíveis.

No seguimento do exposto, apresentam-se aqui algumas estimativas dos caudais de cheia para várias secções da bacia do rio Mondego, realizadas ao longo do tempo por diferentes autores, em contextos distintos, e com a aplicação de diversos métodos.

No trabalho de Sanches (1996) são apresentadas duas estimativas dos caudais de ponta da cheia centenária, afluentes a Coimbra, em regime natural: uma estimativa obtida por aplicação do método estatístico de Gibrat aos caudais médios diários; e outra, aplicando o método de Gumbel aos caudais máximos anuais registados em Coimbra. No mesmo estudo são apresentados também os valores obtidos pelo primeiro tipo de avaliação para a secção da Aguieira, no rio Mondego, e para secções na foz dos rios Alva e Ceira.

No âmbito do Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Mondego (PBHRM) (INAG, 2001a), foram calculados os caudais de cheia em regime natural para diversos períodos de retorno e para várias secções da bacia onde estão instaladas estações hidrométricas. Para as estações com mais de 20 anos de registos, o cálculo dos caudais de cheia baseou-se na análise estatística da série observada de valores máximos anuais do caudal instantâneo. Para outras secções onde essa condição não era cumprida, a estimativa do caudal de ponta de cheia com um determinado período de retorno resultou do cálculo do hidrograma produzido por um hietograma de projeto com a mesma probabilidade de ocorrência, utilizando para esse efeito o programa de simulação hidrológica HEC-1 (INAG, 2001a).

No relatório relativo à “*revisão do estudo das cheias e análise da adequação dos órgãos de descarga*” da barragem da Aguieira (EDP, 2003) são apresentadas várias estimativas para os caudais de ponta de cheia afluentes à secção dessa barragem para períodos de retorno de 100, 1000 e 5000 anos, obtidas por diferentes métodos: por simulação hidrológica, considerando a precipitação uniforme (a) e não uniforme (b) – com três durações de precipitação diferentes –, e por análise estatística e correlação hidrológica estabelecida a partir dos registos de caudais de estações hidrométricas nos rios Mondego e Dão, aplicando as funções de distribuição de probabilidade de Pearson III, Gumbel e a Generalizada dos Extremos.

Marques *et al.* (2005) e Santos *et al.*, (2013) apresentam também estimativas dos caudais de cheia, para vários períodos de retorno, em 4 secções da rede hidrográfica – Aguieira e Ponte Santa Clara, no rio Mondego, Ponte Mucela, no rio Alva, e Ponte Cabouco, no rio Ceira. Estas estimativas foram realizadas pela Universidade de Coimbra no âmbito do estudo hidráulico realizado para a definição das áreas de inundação na zona de intervenção do Programa Polis Coimbra, já referido em 4.5.1.

No âmbito do PGRH4 (ARH-Centro, 2011a) foram realizadas novas estimativas dos caudais de cheia com diferentes períodos de retorno (de 5 a 100 anos) para as seguintes secções da bacia: Ponte Juncais, Nelas, Ponte Tábua e Ponte de Santa Clara, no rio Mondego; Ponte de Santa Clara Dão e Caldas de

São Gemil, no rio Dão; e Ponte Mucela, no rio Alva. Essa avaliação teve por base a análise estatística dos registos de caudais instantâneos máximos anuais nas estações correspondentes.

No relatório do estudo realizado para a elaboração das cartas de risco de inundação para Portugal Continental (APA, 2014) – trabalho esse também já referido em 4.5.1 – são apresentados valores dos caudais de ponta de cheia em regime natural em Coimbra para vários tempos de retorno, aplicando os métodos estatísticos de Gumbel e Gama de 2 parâmetros aos caudais instantâneos máximos anuais registados na secção da Ponte de Santa Clara entre 1899/00 e 1997/98. Segundo o relatório citado (APA, 2014), esses valores foram calculados anteriormente no âmbito do PGRH4. Como os valores dos caudais em regime natural obtidos por aplicação do método de Gumbel foram ligeiramente superiores aos obtidos com o outro método, foram esses os caudais tomados como referência para calcular os caudais de cheia em regime modificado, subtraindo $900 \text{ m}^3/\text{s}$ – valor considerado para o amortecimento de cheias potencialmente realizado pela albufeira da Aguieira – aos caudais em regime natural.

Nos gráficos seguintes representam-se os valores dos caudais de cheia em regime natural, indicados nos estudos acabados de referir, para as secções de Coimbra (Figura 41), da Aguieira (Figura 42), de Ponte Mucela (Figura 43) e de Ponte Cabouro (Figura 44), para os períodos de retorno de 5, 10, 50, 100 e 100 anos.

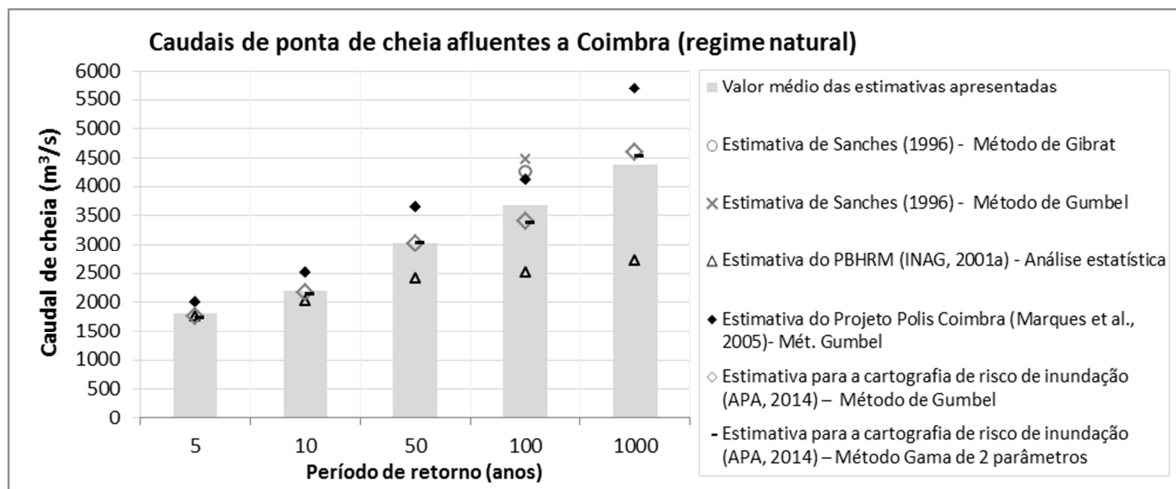


Figura 41. Estimativas dos caudais de cheia afluentes a Coimbra (secção da Ponte de Santa Clara) em regime natural, para vários períodos de retorno, obtidos em vários estudos.

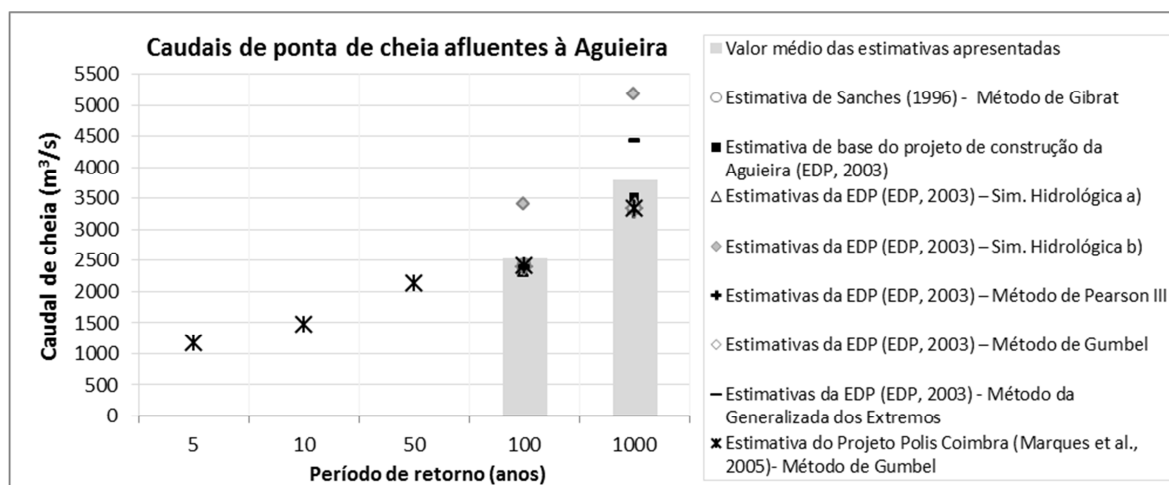


Figura 42. Estimativas dos caudais de cheia afluentes à barragem da Aguieira para vários períodos de retorno, obtidos em vários estudos.

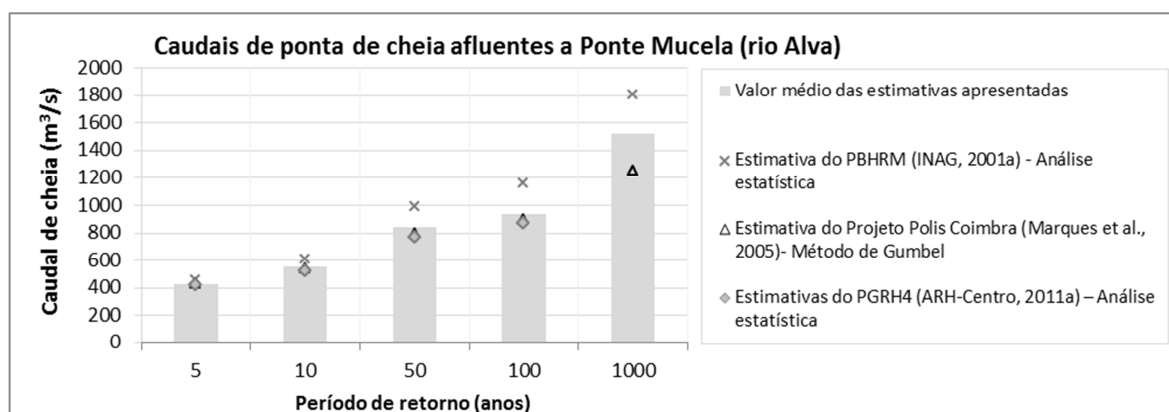


Figura 43. Estimativas dos caudais de cheia no rio Alva (secção da Ponte Mucela - próxima da barragem de Fronhas) para vários períodos de retorno, obtidos em três estudos diferentes.

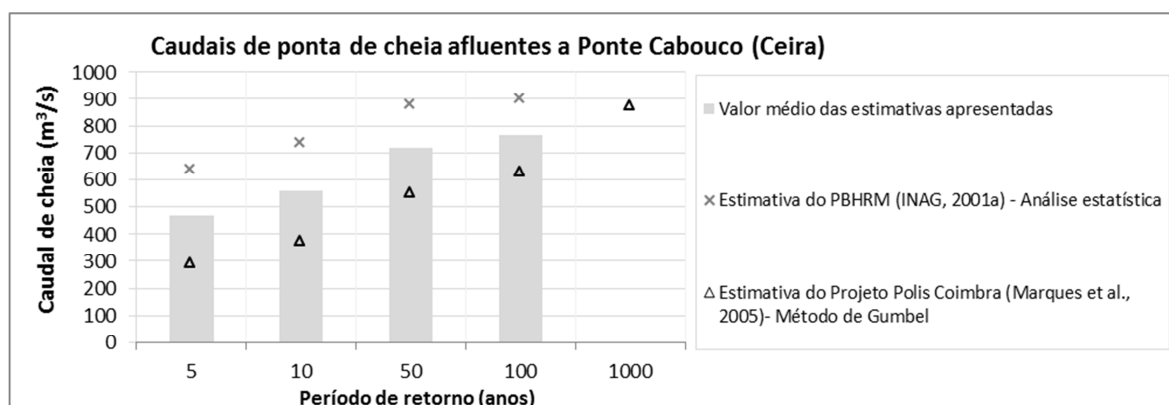


Figura 44. Estimativas dos caudais de cheia no rio Ceira (secção da Ponte Cabouco) para vários períodos de retorno, obtidos em dois estudos diferentes.

4.6. DADOS DISPONÍVEIS

O SNIRH disponibiliza publicamente, via internet, os dados hidrometeorológicos recolhidos na sua rede de monitorização (SNIRH, 2011). Na Figura 45 e na Figura 46 representam-se, respetivamente, as estações meteorológicas e hidrométricas que fazem parte da rede do SNIRH, e que se localizam na área da bacia hidrográfica do rio Mondego.

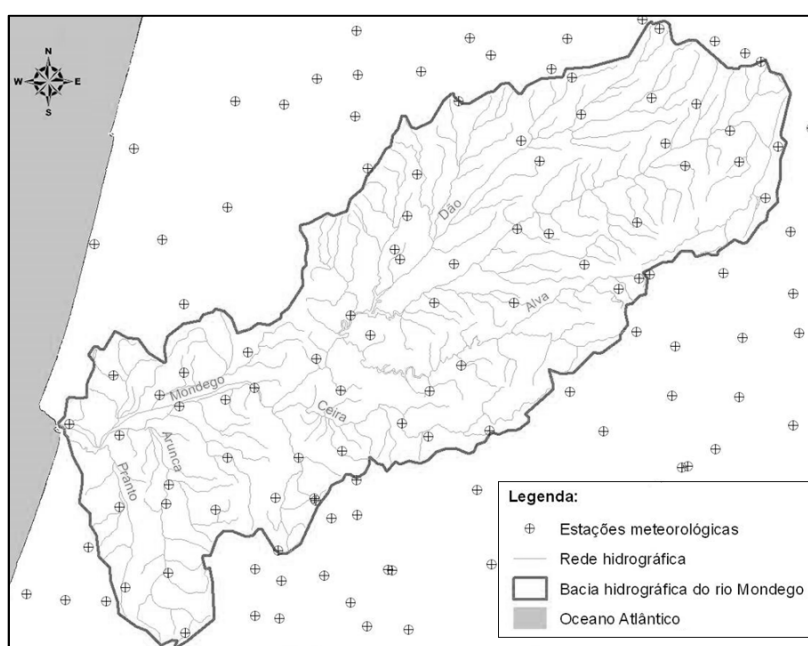


Figura 45. Localização das estações meteorológicas da rede de monitorização do SNIRH, na região da bacia hidrográfica do rio Mondego (SNIRH, 2012a).

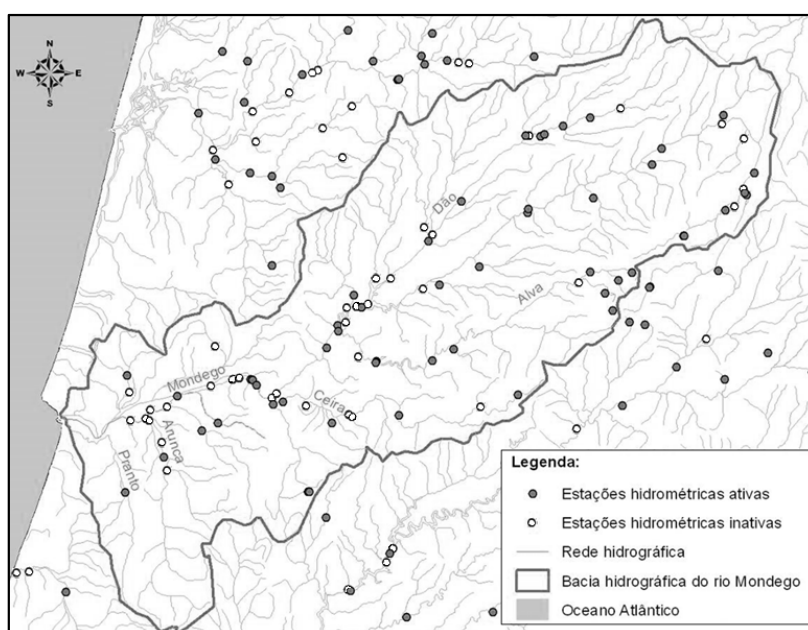


Figura 46. Localização das estações hidrométricas da rede de monitorização do SNIRH, na região da bacia hidrográfica do rio Mondego (SNIRH, 2012a).

Também a EDP possui uma rede de estações hidrometeorológicas, localizadas nas áreas envolventes às albufeiras sob a sua gestão e em outros locais de interesse estratégico para a empresa. Estes dados são, de forma geral, enviados para a base de dados do SNIRH, sendo alguns deles disponibilizados também pelo SNIRH para o público através do respetivo portal da internet (www.snirh.pt), juntamente com os dados da sua própria rede de monitorização.

No entanto, não estão disponíveis no portal público do SNIRH todos os dados das duas redes de monitorização referidas, nomeadamente no que respeita aos dados horários que poderiam ter utilidade para os fins da presente tese. Nessa base de dados *online*, não estão disponíveis registos horários de caudais em nenhum ponto da rede hidrométrica da bacia do Mondego; relativamente a registos de precipitação horária, existem 53 estações na bacia com séries de dados disponíveis, mas a maioria (45 estações) não é atualizada há mais de 5 anos, e de uma forma geral, contêm muitas falhas de dados.

No âmbito do compromisso de fornecimento dos dados necessários para a realização desta tese, assumido pela EDP (ver 1.1), esta empresa disponibilizou ao longo da realização da tese os seguintes dados:

- Registos horários relativos a 3 períodos de cheia que ocorreram na bacia do Mondego, compreendidos entre: i) 18/12/1961 a 03/01/1962; ii) 16 e 23/12/1989; e iii) 22 e 29/01/2001. Esses registos consistem em hietogramas e hidrogramas em estações da rede de monitorização da EDP, e para os últimos dois períodos de cheia, nos dados da exploração dos aproveitamentos hidroelétricos da Aguieira e da Raiva.
- Registos horários referentes ao período de 1/01/2010 a 26/03/2014, nomeadamente registos da exploração dos aproveitamentos hidroelétricos da Aguieira, da Raiva e de Fronhas, e registos da precipitação em quatro estações meteorológicas da sua rede de monitorização (ver representação na Figura 59, apresentada em 5.2.2.1).
- Registos horários da exploração dos aproveitamentos hidroelétricos da Aguieira, da Raiva e de Fronhas, e ainda do Açude-Ponte de Coimbra, relativos ao período de 2 a 12/01/2016 (recebidos já no final deste trabalho).

Os registos da exploração dos aproveitamentos hidroelétricos fornecidos pela EDP contêm os dados relativos aos seguintes parâmetros: a cota na albufeira; o caudal afluente; o caudal turbinado; o caudal descarregado; o caudal ecológico; e nos casos aplicáveis, o caudal bombado e o caudal transferido.

Como referido no ponto 2.2.5., o IPMA possui também uma rede de estações meteorológicas para observação e monitorização das condições meteorológicas, mas os dados relativos a essas estações não estão disponíveis abertamente ao público. No entanto, no seguimento de um contacto efetuado com o IPMA, este forneceu a listagem das estações automáticas da sua responsabilidade que contêm registos horários de diversas variáveis meteorológicas. Uma vez que existem poucas estações meteorológicas do IPMA na área da bacia em estudo (ver Figura 47), que os registos dessas estações não estão disponíveis *online*, e que o seu fornecimento carece de um pedido formal a essa entidade, acompanhado da descrição dos fins a que se destinam, podendo em certos casos ter custos associados

e não havendo garantia de qualidade dos mesmos, optou-se por não se utilizar dados dessa proveniência.

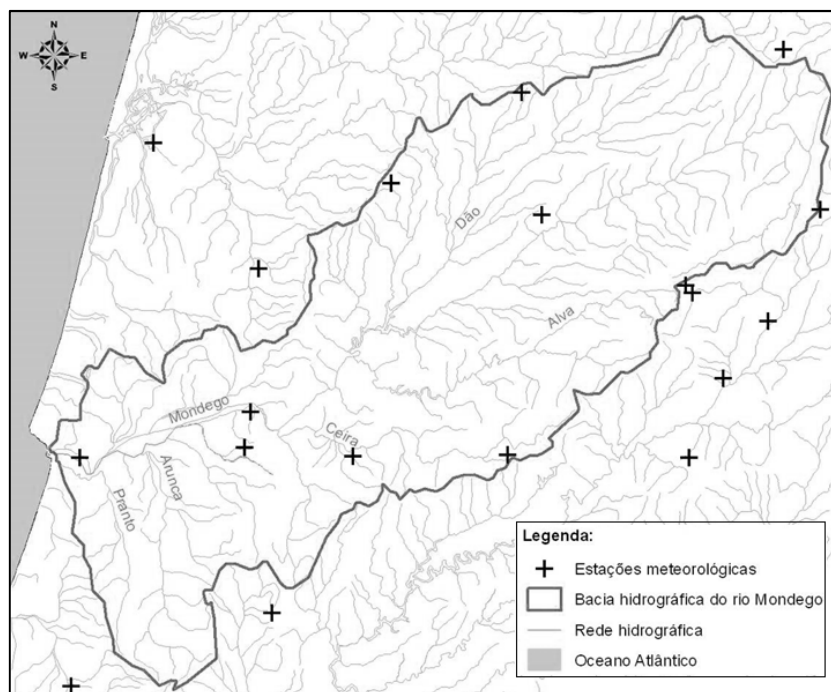


Figura 47. Localização das estações meteorológicas da rede de monitorização do IPMA, na região da bacia hidrográfica do rio Mondego.

Para a realização desta tese foram disponibilizados também, pelo ECMWF, os dados referentes às previsões de precipitação, descritos em 3.3.1.

Relativamente à informação espacial, foi utilizada principalmente a base de dados do Atlas da Água – disponível *online* através do portal do SNIRH (SNIRH, 2012a) – que disponibiliza vários tipos de informação georreferenciada, relativa, por exemplo, à delimitação das bacias e das regiões hidrográficas, ao traçado da rede hidrográfica, à localização das estações da rede de monitorização do SNIRH, e a outras variáveis relacionadas com a caracterização dos recursos hídricos, tais como a variação espacial do Número de Escoamento (ver Figura 48).

Para realização deste trabalho foi fornecido também o MDT relativo à área da bacia do rio Mondego (Figura 49), “recortado” do MDT geral da Região Hidrográfica 4 (ver 4.3.2).

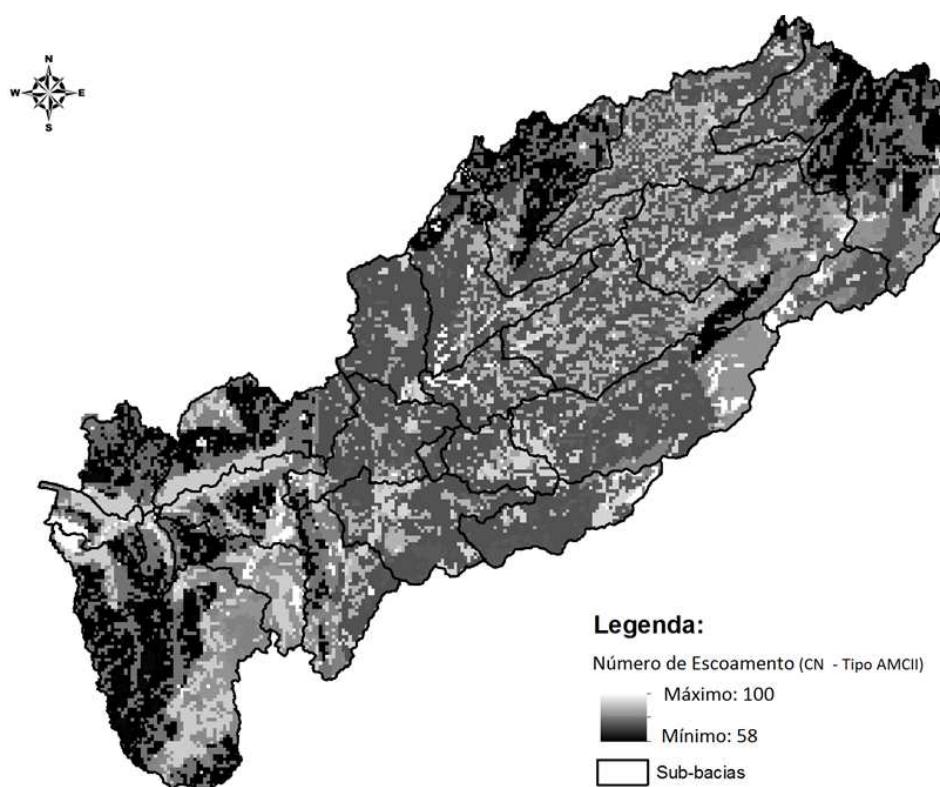


Figura 48. Variação espacial o CN (para condições do tipo AMCII) na bacia hidrográfica do rio Mondego (resolução de 500x500 m) (SNIRH, 2012a).

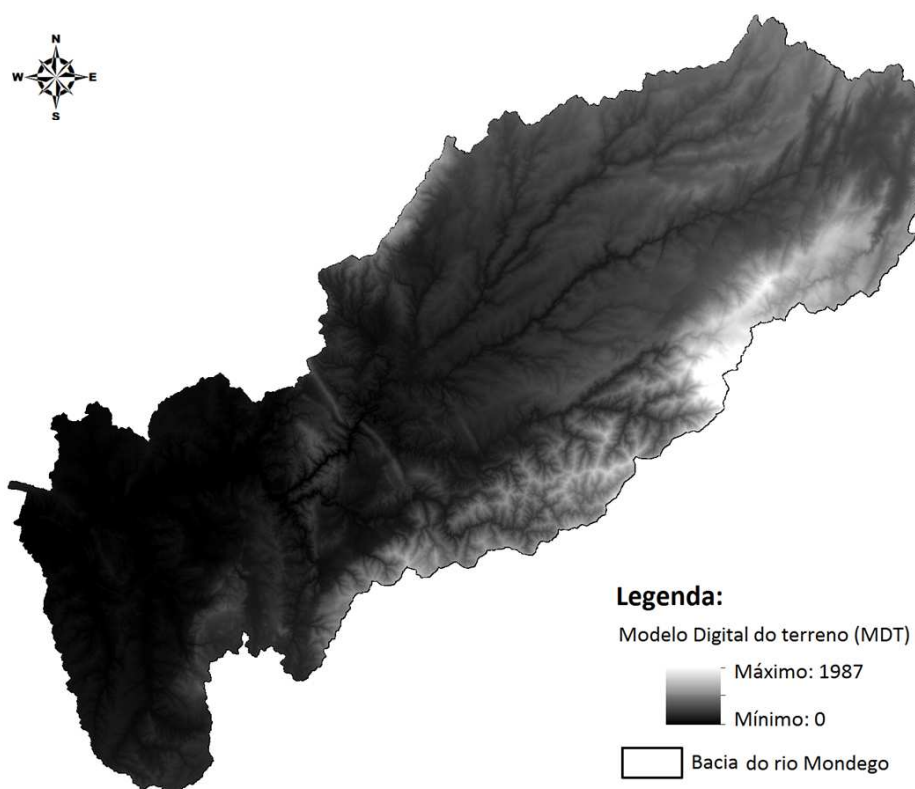


Figura 49. Representação do MDT da bacia hidrográfica do rio Mondego, com uma resolução de 25x25 m.

5

MODELAÇÃO E PREVISÃO HIDROLÓGICA

5.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo desenvolve-se a aplicação, ao caso de estudo precedentemente exposto, das componentes da metodologia proposta nesta tese (ver Capítulo 3) inerentes à modelação e previsão hidrológica, nomeadamente: i) os detalhes da construção e da calibração do modelo hidrológico; ii) o processamento dos dados de previsão de precipitação; iii) as particularidades das simulações hidrológicas executadas com previsões de precipitação por *ensemble*, e iv) a análise e a verificação das previsões hidrológicas realizadas.

Sempre que aplicável, após a descrição de cada uma das componentes da aplicação são apresentados os respetivos resultados e é efetuada a sua análise e discussão.

No final do capítulo apresenta-se uma breve síntese sobre as componentes da metodologia aqui abordadas e a sua aplicação para a previsão operacional de cheias na bacia do Mondego, constituída por uma exposição das principais conclusões decorrentes dos resultados obtidos e pela identificação das limitações encontradas.

5.2. PREPARAÇÃO, CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO HIDROLÓGICA

5.2.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO

Um dos objetivos específicos da presente tese é desenvolver um modelo para prever, de forma contínua no tempo e com 10 dias de antecedência, os caudais de cheia em regime natural afluentes às secções de referência das principais sub-bacias do rio Mondego, onde o conhecimento dessas previsões pode ter um valor significativo do ponto de vista económico e/ou social.

Neste contexto, estabeleceram-se como principais pontos de previsão de caudais de cheia as secções correspondentes às barragens da Aguieira e de Fronhas – cujas albufeiras têm como função o controlo de cheias, entre outras utilizações – e a secção correspondente ao Açude-Ponte de Coimbra, que se localiza numa zona muito vulnerável às cheias.

Para realizar as referidas previsões, foi desenvolvido um modelo hidrológico da bacia do rio Mondego com recurso ao programa de simulação HEC-HMS. A construção desse modelo seguiu a metodologia geral descrita em 3.2.1, cuja aplicação específica a este caso se passa de seguida a explicar.

5.2.1.1. Modelo de bacia

O modelo de bacia foi construído com o auxílio do programa ArcMap e das suas aplicações ArcHydro Tools e HEC-GeoHMS, tendo por base o MDT da área da bacia, em formato *raster* com uma resolução 25x25 m (ver Figura 49), e os dados, em formato vetorial, relativos à delimitação da bacia hidrográfica do rio Mondego, ao traçado da sua rede hidrográfica principal e à localização das estações hidrométricas da rede de monitorização do SNIRH, obtidos no Atlas da Água (SNIRH, 2012a) (ver Figura 46).

Tendo em conta esses dados, definiram-se 27 sub-bacias ou unidades de análise, que correspondem às áreas que drenam para as secções de referência do modelo hidrológico. As secções de referência são os pontos do modelo onde se obtêm previsões de caudais afluentes nas linhas de água, em resultado das simulações realizadas. As secções seleccionadas correspondem a pontos notáveis da rede hidrográfica, situados em localidades e/ou estações hidrométricas relevantes ou nas confluências das principais linhas de água da bacia. Um critério adicional considerado para a seleção das secções de referência consistiu na imposição de uma área máxima por sub-bacia, correspondente a 10% da área da bacia total, ou seja, 665 Km². Na Figura 50 apresenta-se o esquema conceptual do modelo de bacia definido, com a representação das 27 sub-bacias definidas e dos 54 troços fluviais gerados automaticamente pelas aplicações informáticas referidas, através do MDT e do traçado da rede hidrográfica principal.

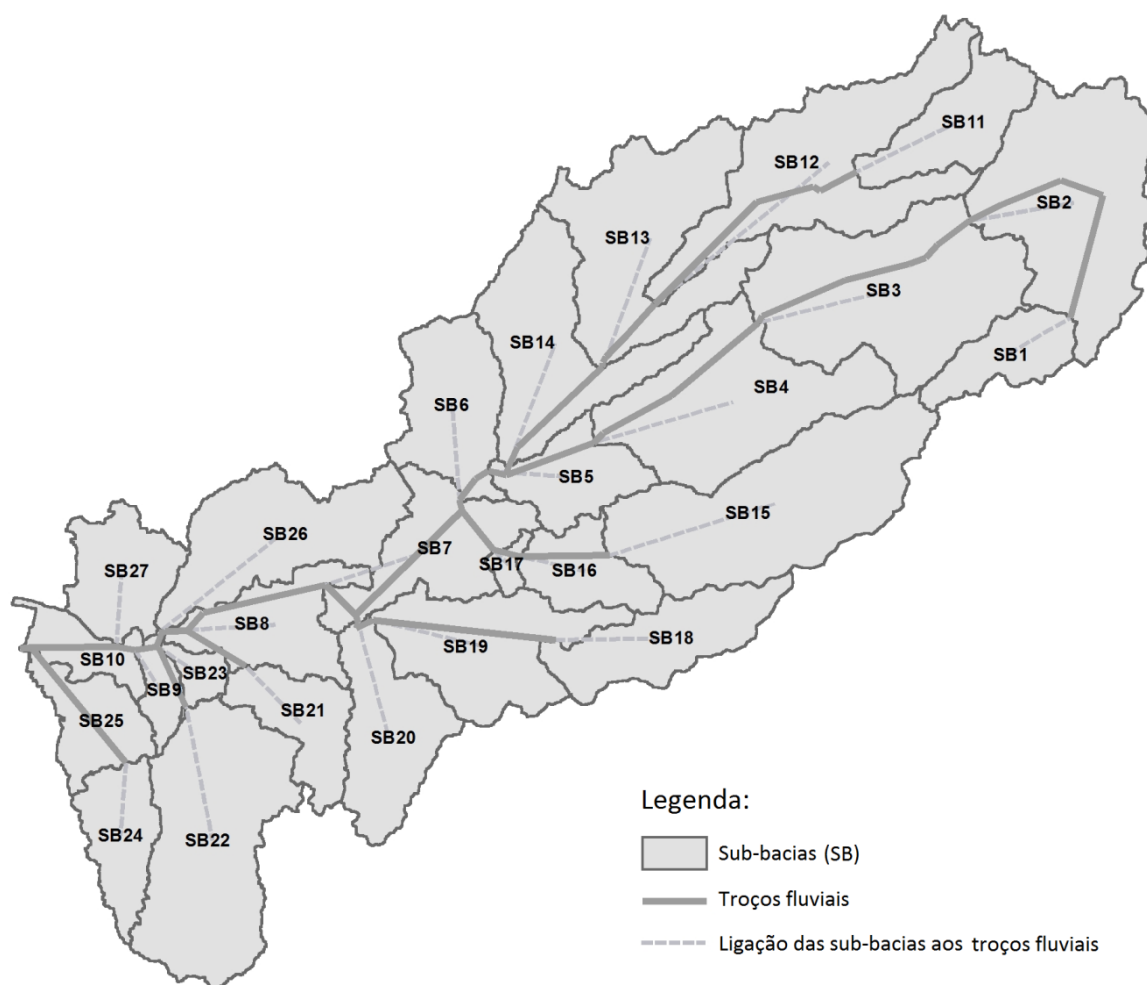


Figura 50. Representação esquemática do modelo de bacia construído.

5.2.1.2. Modelo hidromorfológico

Conforme indicado em 3.2, para representar os vários processos hidrológicos com importância para a previsão de cheias na bacia, foram considerados os métodos e respetivos parâmetros de simulação apresentados no Quadro 8 (em 3.2.1).

Caracterização dos parâmetros relativos às sub-bacias

No Quadro 18 apresentam-se os valores dos parâmetros de simulação para cada sub-bacia, obtidos inicialmente, de forma automática, através das aplicações informáticas referidas anteriormente (em 3.2.1 e 5.2.1.1).

Quadro 18. Caracterização inicial dos parâmetros de simulação de cada sub-bacia.

Sub-bacia	Nome da secção de referência	Área (km ²)	% de área impermeável	CN inicial	Retenção inicial (mm)	Tempo de resposta (min)
SB1	Videmonte	121,22	0,06	76,31	15,77	188,55
SB2	Pt. Juncais	485,06	2,48	69,02	22,80	371,61
SB3	Nelas	518,49	2,00	75,70	16,31	335,71
SB4	Táboa	416,66	2,43	75,23	16,72	385,03
SB5	Agueira	148,01	2,05	75,53	16,46	216,12
SB6	Raiva	221,97	1,46	72,54	19,23	250,27
SB7	Coimbra	229,02	4,79	73,54	18,28	256,48
SB8	Pt ST Eulália	190,19	7,43	75,92	16,16	299,35
SB9	Montemor-o-Velho	50,92	1,63	73,41	18,40	207,94
SB10	Foz Mondego	86,41	7,71	79,55	13,06	237,49
SB11	Pt St Clara Dão	176,09	1,52	72,01	19,74	279,29
SB12	Caldas S. Gemil	444,13	3,38	75,02	16,91	436,00
SB13	Ferreirós / Sobral	425,29	4,85	70,06	21,71	385,02
SB14	Foz Dão	335,47	2,53	73,83	18,01	321,44
SB15	Secarias	514,32	0,34	74,37	17,51	301,14
SB16	Fronhas	129,52	1,24	75,48	16,50	210,55
SB17	Pt Mucela	21,74	1,47	72,66	19,12	82,78
SB18	Pt Góis	211,11	1,19	74,03	17,82	249,75
SB19	Pt Cabouco	291,76	1,80	74,20	17,66	250,20
SB20	Pt Conraria	230,00	2,21	74,72	17,19	275,07
SB21	Pt Casével	144,00	2,23	78,95	13,56	217,37
SB22	Pt Mocate	469,19	4,45	73,74	18,09	377,13
SB23	Foz Arunca	38,18	2,07	67,44	24,52	194,08
SB24	Pt Casal da Rola	140,82	4,40	64,10	28,45	317,06
SB25	Foz Pranto	131,95	4,64	71,93	19,83	381,15
SB26	Afluente MD1	317,46	4,80	72,24	19,53	384,84
SB27	Afluente MD2	165,88	4,62	69,76	22,02	423,31

A delimitação das sub-bacias e o cálculo das respetivas áreas teve por base o MDT anteriormente referido. A percentagem de impermeabilização de cada sub-bacia exibida no Quadro 18 foi calculada através da Carta de Impermeabilização do Solo, em formato *raster* com resolução 20x20 m, obtida no portal da Agência Europeia do Ambiente (EEA, 2012). Os valores apresentados dos números de escoamento foram obtidos a partir da Carta Digital de Números de Escoamento – para condições de humidade do tipo AMCII (ver Anexo 1) – em formato *raster*, com uma resolução de 500x500 m, que consta da base de dados do Atlas da Água (SNIRH, 2012a) (ver Figura 48). Os valores da retenção inicial e do tempo de resposta foram depois gerados automaticamente pelo HEC-GeoHMS, com base

no Número de Escoamento (CN) de cada sub-bacia (ver descrição do processo de cálculo no Anexo 1).

Todavia, tal como descrito na metodologia geral (ver 3.2), na aplicação do método de cálculo do volume total de escoamento (Método do Número de Escoamento do SCS), a retenção inicial (RI) e a percentagem de área impermeável (AI) foram consideradas nulas em todas as sub-bacias.

No cálculo do escoamento direto, os valores dos tempos de resposta das sub-bacias (T_{lag}) foram considerados constantes no tempo e iguais aos calculados inicialmente para cada sub-bacia.

Tais considerações deveram-se ao facto de ter sido constatado que a variação destes parâmetros, principalmente a percentagem de área de impermeabilização e o tempo de resposta da bacia, tem uma influência diminuta – mesmo para eventos de precipitação muito intensa – nos resultados de simulações realizadas para avaliar a sensibilidade do modelo face a alterações desses parâmetros (ver exemplos na Figura 51 e na Figura 52).

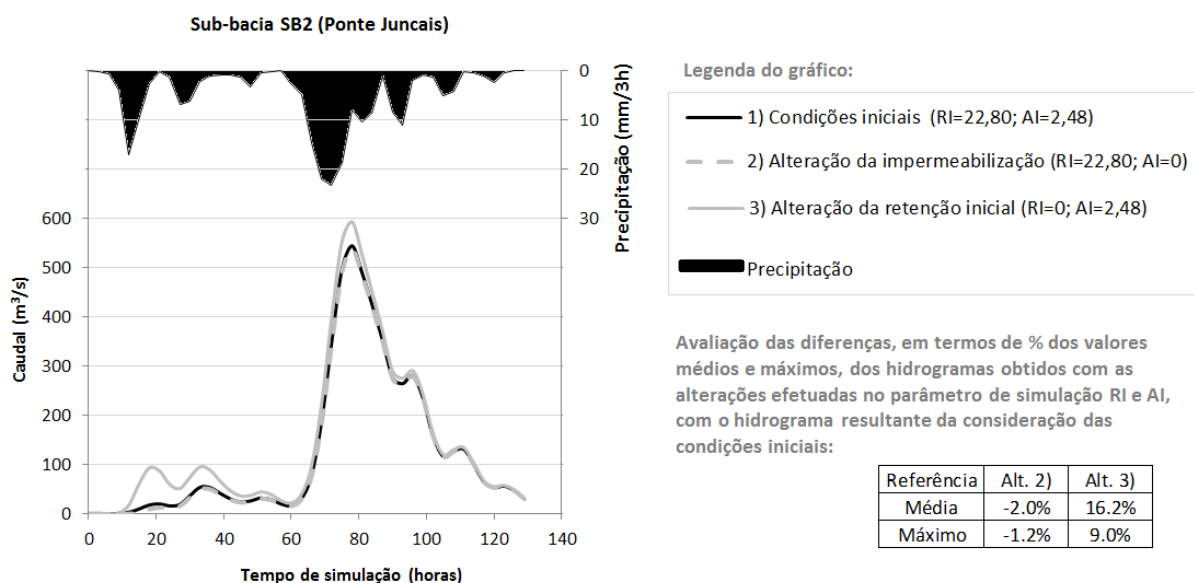


Figura 51. Hidrogramas gerados na sub-bacia SB2, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo às alterações dos parâmetros: i) percentagem de área impermeável (AI) e ii) retenção inicial (RI). Os restantes parâmetros do modelo mantiveram-se constantes, com os valores indicados no Quadro 18. Nas quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001, que corresponde a uma das maiores cheias registadas na bacia do Mondego (ver 4.5.2).

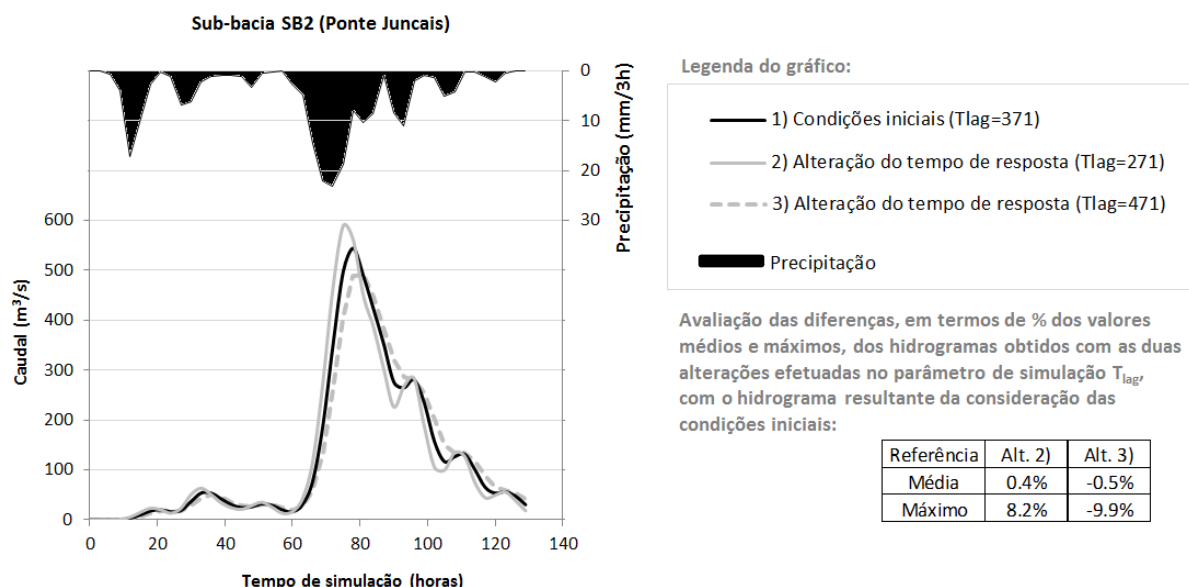


Figura 52. Hidrogramas gerados na sub-bacia SB2, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo a alterações do tempo de resposta da bacia (T_{lag}). Os restantes parâmetros do modelo mantiveram-se constantes, com os valores indicados no Quadro 18. Nas quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001.

No cálculo do hidrograma gerado em cada sub-bacia em resultado de um evento de precipitação ocorrido (ou seja, não considerando o escoamento de base), considerou-se apenas como variável no tempo, e passível de calibração, o parâmetro CN, que deverá variar em função das características superficiais do terreno, nomeadamente das condições de humidade anteriores. De acordo com o exposto na metodologia geral (ver 3.2.2.1), neste trabalho considerou-se que este parâmetro deverá variar apenas entre 30 e 80, assumindo valores discretos numa escala de dez, ou seja: CN = 30, 40, 50, 60, 70 e 80.

Como se pode observar no exemplo apresentado na Figura 53, o modelo mostra-se sensível a variações deste parâmetro, apresentando diferenças superiores a 15% na estimativa do caudal de ponta de cheia para variações deste parâmetro de cerca de 10 unidades, que são variações relativamente normais face à variabilidade deste parâmetro com as características da bacia (ver Anexo 1: Quadros A1.1. e A1.2).

Por outro lado, a calibração adequada desse parâmetro ao longo do tempo – descrita seguidamente em 5.2.2 –, ajustada à variação das características hidrometeorológicas na bacia, permitirá atenuar também os efeitos nos resultados das simulações causados pela fixação dos parâmetros de simulação correspondentes à retenção inicial, à área impermeável e ao tempo de resposta da bacia.

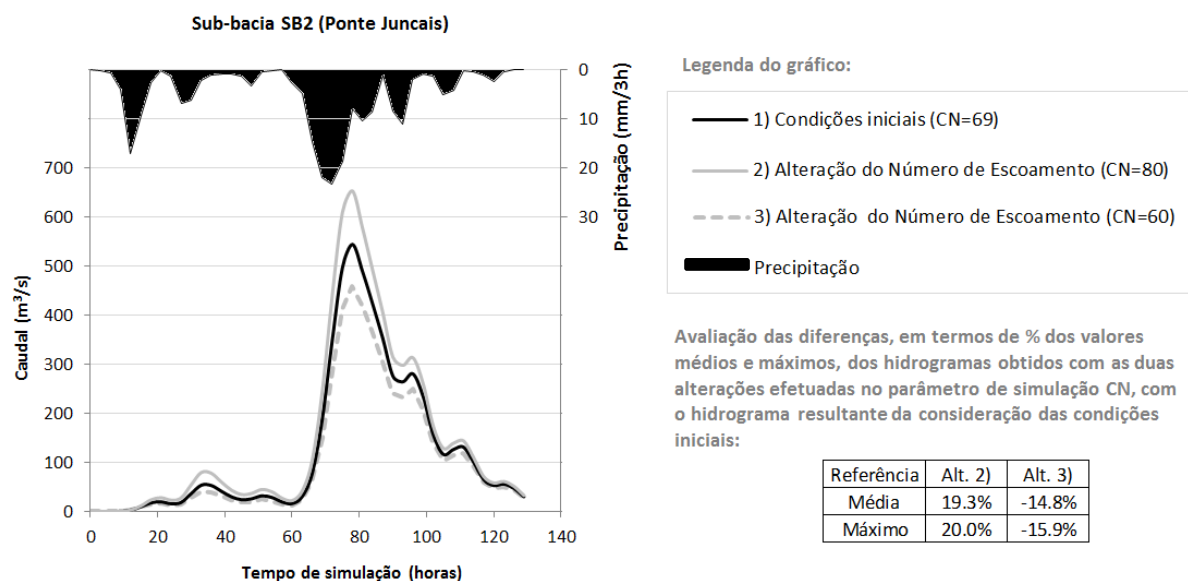


Figura 53. Hidrogramas gerados na sub-bacia SB2, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo a alterações do parâmetro CN. Os restantes parâmetros do modelo mantiveram-se constantes, com os valores indicados no Quadro 18. Nas quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001.

No método de cálculo do escoamento de base, o caudal inicial é tratado como condição inicial do modelo, sendo, portanto, um dado de entrada para cada sub-bacia. Como não há registos atuais e contínuos de caudais na maioria das secções de referência do modelo de bacia construído, optou-se por introduzir em cada sub-bacia um valor do caudal inicial por unidade de área, que corresponde ao quociente entre o caudal registado numa determinada secção da bacia – correspondentes a uma estação hidrométrica em estado operacional – às 00:00h do dia da simulação a executar e a área de drenagem correspondente (soma das áreas das sub-bacias existentes a montante). Atendendo a que, na realização desta tese, apenas estavam disponíveis os registos horários contínuos de caudais, em regime natural nas estações hidrométricas localizadas nas barragens da Aguieira e de Fronhas – aqui definidas como as secções de controlo do modelo (ver definição em 3.2.2.2.) – e em regime modificado na secção da barragem da Raiva, a atribuição dos valores deste parâmetro em cada sub-bacia obedeceu aos seguintes critérios:

- Nas sub-bacias a montante da barragem da Aguieira – SB1, SB2, SB3, SB4, SB5, SB11, SB12, SB13 e SB14 – a condição inicial do modelo é igual ao quociente entre o caudal registado na estação da Aguieira e a área total que drena para essa secção (soma das áreas das sub-bacias referidas);
- Nas sub-bacias dos afluentes da margem esquerda do rio Mondego localizados a jusante da Aguieira – SB15, SB16, SB17, SB18, SB19, SB20, SB21, SB22, SB23, SB24 e SB25 – a condição inicial do modelo é igual ao quociente entre o caudal registado na estação de Fronhas e a área total que drena para essa secção (soma das áreas das sub-bacias SB15, SB16);

- Nas sub-bacias a jusante da barragem da Aguieira, localizadas na zona central e na margem direita do rio Mondego – SB6, SB7, SB8, SB9, SB10, SB26 e SB27 – a condição inicial do modelo é igual ao quociente entre o caudal natural gerado na sub-bacia SB6 – calculado através da diferença entre o caudal registado na estação de Raiva e o registado na estação da Aguieira – e a área dessa sub-bacia.

Relativamente ao parâmetro que reinicia o cálculo do escoamento de base, designado por relação ao pico (R_p) (ver significado no Anexo 1 – A1.3), foi considerado um valor constante e igual a 0,3 para todas as sub-bacias. Este valor foi estimado através da análise de sensibilidade do modelo face a alterações deste parâmetro, realizada aquando da calibração inicial dos parâmetros de simulação relativos às sub-bacias, efetuada com base na sub-bacia SB1. A escolha dessa sub-bacia deveu-se ao facto da mesma, no modelo, contribuir de forma exclusiva para uma secção de referência (Videmonte) na qual se dispõe de registos de caudais horários no período da cheia ocorrida em janeiro de 2001, possibilitando a comparação dos resultados do modelo relativos a essa sub-bacia com os valores registados na secção correspondente.

Como se pode avaliar pelos diferentes resultados apresentados na Figura 54, o modelo hidrológico é muito sensível a variações do parâmetro R_p . Contudo, o valor adotado ($R_p=0,3$) pareceu corresponder a uma solução de equilíbrio para o conjunto das sub-bacias avaliadas, conforme se poderá concluir adiante com a apresentação dos resultados da calibração do modelo (ver 5.2.2).

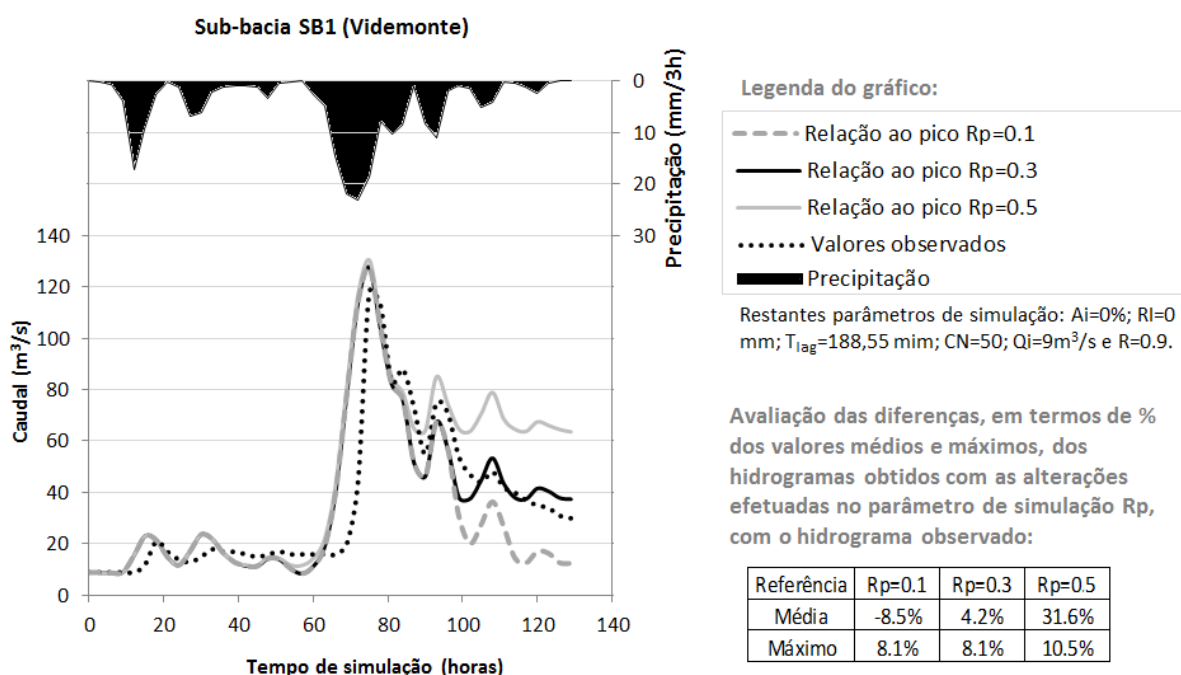


Figura 54. Hidrogramas gerados na sub-bacia SB1, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo a alterações do parâmetro R_p . Os restantes parâmetros do modelo mantiveram-se constantes, com os valores indicados na legenda. Nas quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001.

O parâmetro R_p tem influência sobretudo no ramo descendente do hidrograma de cheia (ver Figura 54), estabelecendo o instante, após o pico do hidrograma de cheia, a partir do qual é aplicado o método de recessão para calcular o escoamento total até ao início de um novo evento de precipitação (ver descrição do método de recessão no Anexo A1.3).

Por outro lado, a constante de recessão (R) corresponde à taxa de decaimento do escoamento de base, que traduz a diminuição do escoamento de base entre eventos de precipitação. Conforme já referido na metodologia geral (ver 3.2.2.1), neste trabalho considerou-se que este parâmetro deverá variar em função do valor da mais recente recarga de água subterrânea (ocorrida nos dois meses anteriores à data de simulação), assumindo valores de 0,7 ou 0,9, que estão na gama dos valores recomendados pelo manual do programa HEC-HMS (Feldman, 2000). Foram estipulados apenas estes dois valores por uma questão de simplificação do processo de calibração, e porque efetivamente não se verifica uma diferença significativa nos resultados das simulações obtidos com estes dois valores (ver exemplo na Figura 55).

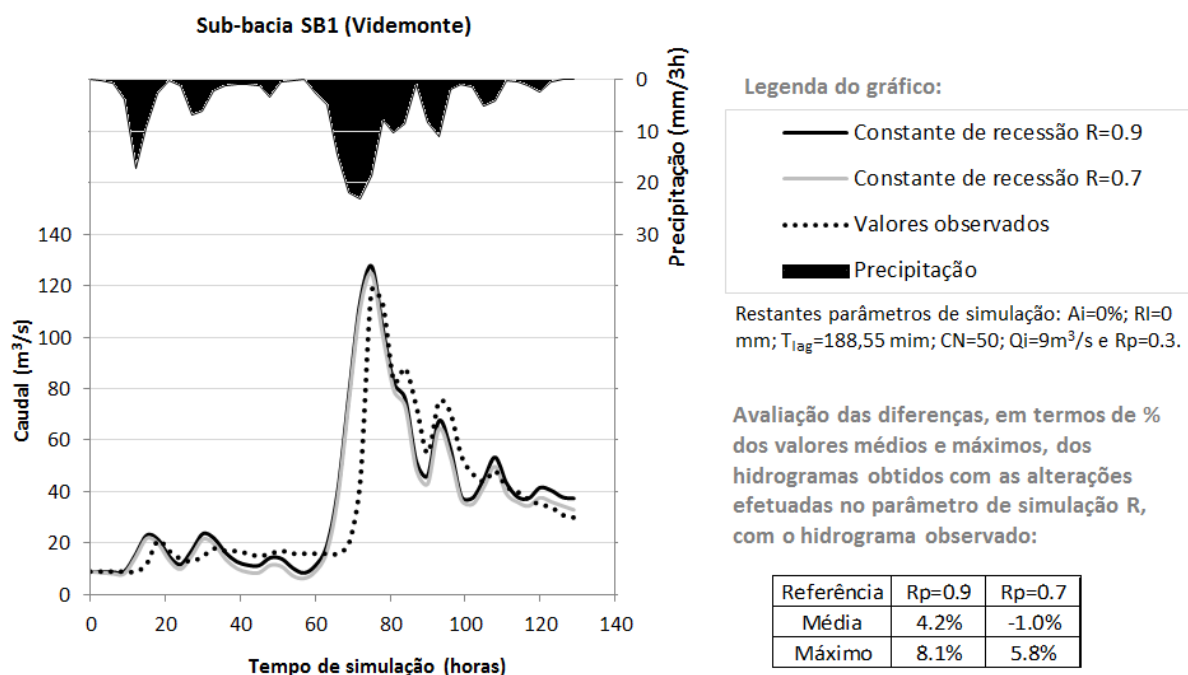


Figura 55. Hidrogramas gerados na sub-bacia SB1, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo a alterações do parâmetro R . Os restantes parâmetros do modelo mantiveram-se constantes, com os valores indicados na legenda. Nas quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001.

Caracterização dos parâmetros relativos aos troços fluviais

Relativamente às características dos troços fluviais, os valores do comprimento e da inclinação de cada um dos troços foram obtidos também de forma automática através do MDT, com recurso à aplicação Arc HydroTools do ArcGIS.

Na caracterização das secções transversais, considerou-se que todos os troços fluviais têm uma secção trapezoidal, com margens inclinadas a 45°. Para estimar a largura da base dessas secções, foram realizadas medições – sobre as fotografias aéreas georreferenciadas incluídas no ArcMap – da largura real da superfície de água dos troços fluviais em diversas secções da rede hidrográfica. Com base nessas medições, e tendo em conta as alturas médias de água nos vários troços – dadas pelos registos das estações hidrométricas – estimaram-se valores para a largura da base das respectivas secções padrão.

No Quadro 19 apresentam-se os valores adotados na caracterização dos troços fluviais integrados em cada sub-bacia do modelo hidrológico.

Quadro 19. Valores dos parâmetros de simulação relativos aos troços fluviais, obtidos para cada sub-bacia.

Sub-bacia	Nº de troços	Comprimento total (m)	Inclinação média (%)	Largura da base do canal (m)
SB2	4	47339	0,89	15
SB3	6	35141	0,46	15
SB4	3	29614	0,16	20
SB5	3	18494	0,30	30
SB6	2	9124	0,20	30
SB7	5	51236	0,12	50
SB8	4	32588	0,05	75
SB9	5	6291	0,07	100
SB10	5	19633	0,02	150
SB12	4	36967	0,55	15
SB13	4	11409	0,30	15
SB14	2	19737	0,04	20
SB16	1	28526	0,22	15
SB17	1	7520	0,26	15
SB19	1	37758	0,42	15
SB20	2	4053	0,15	15
SB23	1	8807	0,04	15
SB25	1	26122	0,02	15

Quanto aos coeficientes de Manning, considerou-se um valor igual a 0,05 para todos os troços da rede hidrográfica, que corresponde a um valor normal para cursos de água naturais (Lencastre e Franco, 2010).

Tal pressuposto, bem como a caracterização aproximada que foi realizada das secções transversais, deveram-se, em primeira análise, à dificuldade de caracterização individual de cada um dos troços, devido à extensão e à inexistência de dados suficientes para a adequada quantificação da variação das características do leito ao longo de toda a rede hidrográfica. Entretanto, como se pode verificar pelos

exemplos apresentados na Figura 56 e na Figura 57 – onde se mostram os resultados de simulações realizadas para avaliar a sensibilidade do modelo face a alterações do coeficiente de Manning e da largura das secções transversais dos troços fluviais –, pôde constatar-se que o modelo hidrológico não é sensível a alterações significativas desses dois parâmetros de simulação.

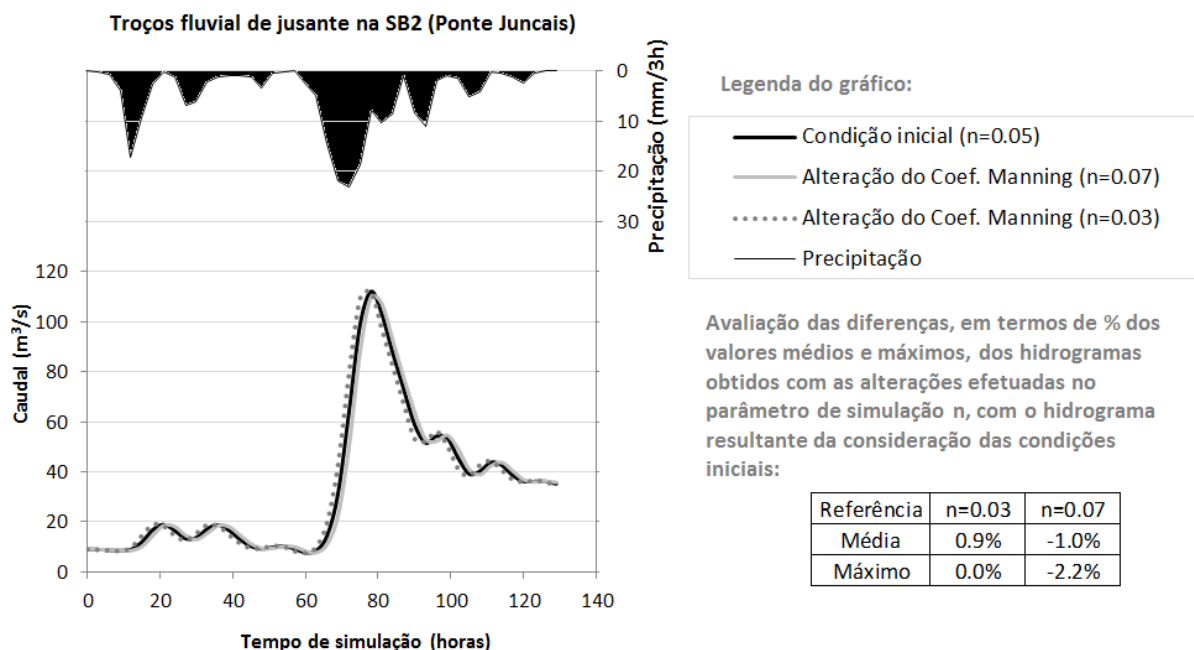


Figura 56. Hidrogramas efluentes do troço fluvial localizado mais a jusante dentro da bacia SB2, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo a alterações do parâmetro n (Coeficiente de Manning), mantendo os restantes parâmetros do modelo constantes. Nas quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001.

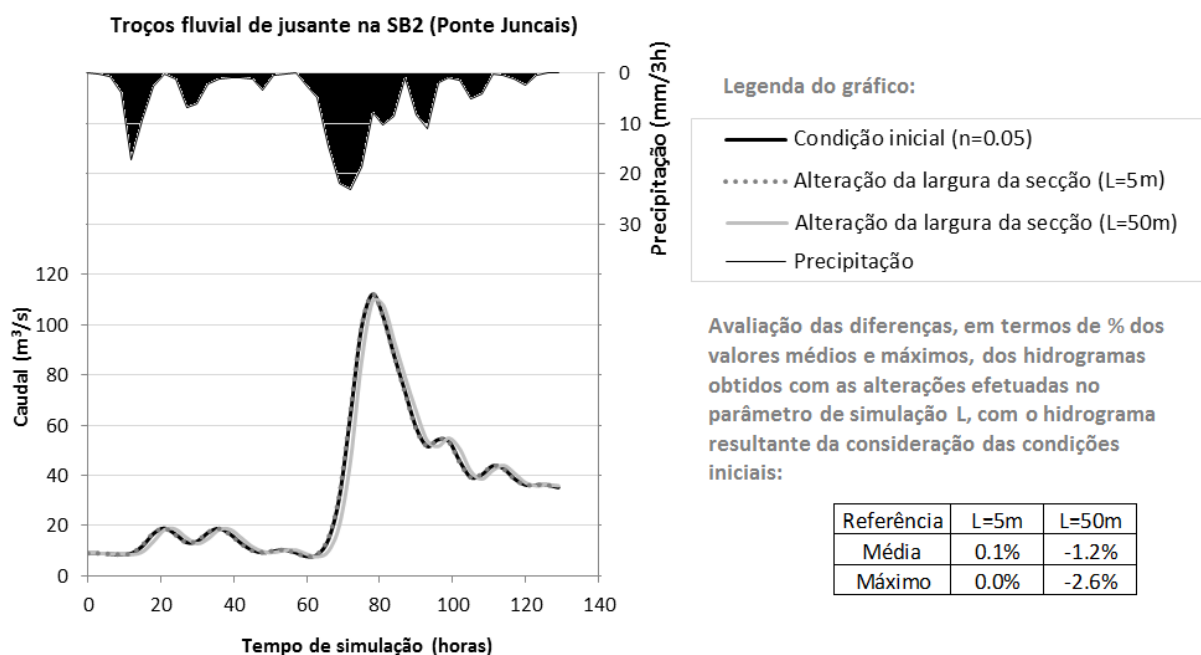


Figura 57. Hidrogramas efluentes do troço fluvial localizado mais a jusante dentro da bacia SB2, resultantes das simulações realizadas para testar a sensibilidade do modelo a alterações do parâmetro L (largura da secção transversal), mantendo os restantes parâmetros do modelo constantes. Nas quatro simulações realizadas foi utilizada a precipitação registada na estação meteorológica de Santa Comba Dão no período de 23 a 29 de janeiro de 2001.

5.2.1.3. Modelo meteorológico

Uma vez que se dispõe de poucas estações hidrométricas na bacia com registos de caudais horários em regime natural (ver 4.6), o modelo hidrológico só pode ser calibrado em algumas das secções de referência. Na realidade, apesar do modelo ser executado de forma semi-distribuída, aplicando individualmente os vários processos de cálculo a cada uma das 27 sub-bacias, os resultados do modelo só podem ser avaliados em determinadas secções, que agregam a contribuição de várias sub-bacias.

Deste modo, e para facilitar o processo de tratamento e introdução dos dados de precipitação no modelo hidrológico, reduziu-se o número de sub-bacias para efeitos de consideração da distribuição da precipitação. Assim, em vez de se considerarem hietogramas específicos para cada uma das 27 sub-bacias, agruparam-se as sub-bacias inicialmente definidas em 6 unidades de precipitação (Figura 58) e definiram-se os hietogramas para cada uma dessas áreas. Essas unidades foram definidas tendo em conta que a sua secção de drenagem se situa numa secção onde estavam disponíveis registos contínuos de caudais horários – Aguieira, Fronhas e Raiva – ou num ponto considerado importante para contabilização do escoamento, como são os casos das secções da Foz do Rio Dão, de Coimbra e da Foz do Rio Mondego.



Figura 58. Áreas consideradas para efeito da distribuição da precipitação no modelo hidrológico (unidades de precipitação).

O passo temporal de cálculo adotado na modelação foi de 3 horas, que corresponde ao passo temporal dos dados de precipitação que serão utilizados como entrada do modelo.

5.2.2. CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO PARA PREVISÃO CONTÍNUA DE CAUDAIS

Na presente secção descrevem-se os dados utilizados e os resultados dos processos de calibração e verificação do modelo hidrológico. Os procedimentos seguidos, cuja descrição se encontra na secção 3.2.2, foram aplicados nas secções correspondentes às barragens da Agueira e de Fronhas, que conforme já definido no ponto 5.2.1.2, constituem as secções de controlo do modelo. Para cada uma dessas secções procurou-se o melhor ajuste dos parâmetros de calibração do modelo – CN e R – para vários estados hidrometeorológicos, em particular, quando o escoamento previsto atinge valores associados a situações de cheia.

Os critérios de ajuste dos parâmetros de calibração, estabelecidos para a secção da Agueira, são depois aplicados a todas as sub-bacias do modelo localizadas a montante dessa secção – SB1, SB2, SB3, SB4, SB5, SB11, SB12, SB13 e SB14 – e nas sub-bacias a jusante, localizadas na zona central e na margem direita do rio Mondego – SB6, SB7, SB8, SB9, SB10, SB26 e SB27. Por outro lado, os critérios estabelecidos para a secção de Fronhas são posteriormente aplicados nas restantes sub-bacias do modelo, localizadas nos afluentes na margem esquerda do rio Mondego a jusante da Agueira – SB6, SB7, SB8, SB9, SB10, SB26 e SB27.

Para cada uma das simulações realizadas, fez-se a avaliação do desempenho do modelo, quer na fase de calibração quer na fase de verificação, através do cálculo de medidas estatísticas que quantificam a precisão das simulações em relação aos valores observados.

5.2.2.1. Dados utilizados

Os dados de precipitação utilizados como entrada do modelo, para efeitos de calibração e verificação do mesmo, corresponderam aos valores da precipitação média ponderada em cada uma das unidades de precipitação representadas na Figura 58. Esses dados foram obtidos através da interpolação espacial, pelo método de *Thiessen* (Thiessen, 1911), dos valores da precipitação horária registada nas quatro estações pluviométricas representadas na Figura 59, os quais foram depois convertidos em dados de precipitação total em 3 horas.

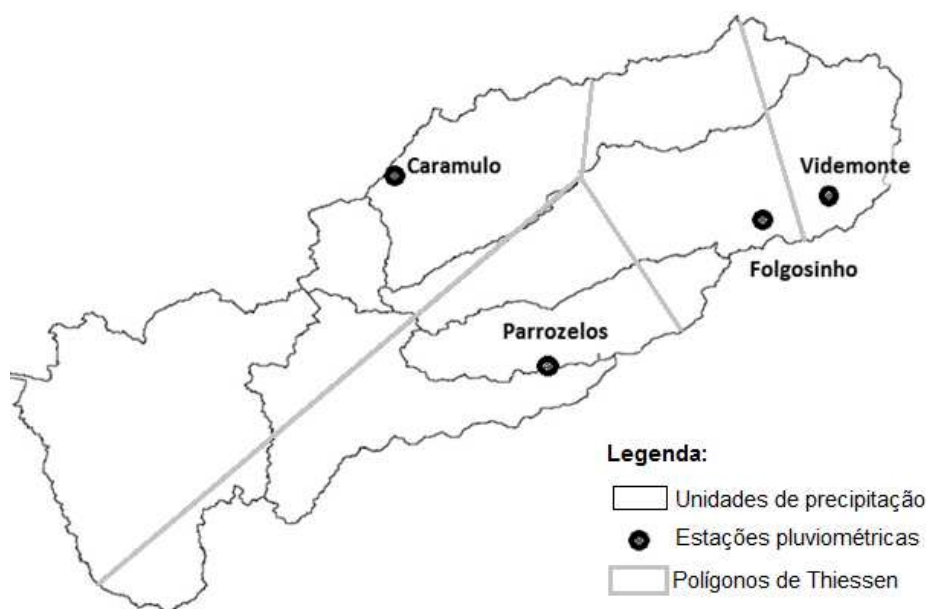


Figura 59. Representação das 4 estações pluviométricas e respetivos polígonos de Thiessen, considerados na avaliação dos dados de precipitação utilizados na calibração e verificação do modelo hidrológico.

Os dados relativos aos caudais observados, usados para comparação com os resultados do modelo, corresponderam aos caudais médios horários afluentes às barragens da Aguieira e de Fronhas. De forma idêntica, para que todos os dados estivessem expressos na mesma escala temporal, converteram-se esses dados para valores médios em períodos de três horas.

Os dados de precipitação e de escoamento acima referidos foram usados também para calcular os valores das variáveis hidrometeorológicas $RV_{-.5}$, $TP_{+.3}$ e $TP_{-.60}$.

Conforme indicado em 3.2.2.2., o processo de calibração do modelo e o subsequente processo de verificação basearam-se em simulações diárias, com um passo temporal de 3 horas e um alcance de 10 dias (240 horas), iniciadas com o caudal observado às 00:00h de cada dia.

Para a calibração do modelo, considerou-se o período de 30 dias compreendido entre 14/12/2013 e 12/01/2014 – período de calibração – que incluiu os dois primeiros eventos de cheia do ano hidrológico 2013/14 que causaram inundações na zona marginal de Coimbra: i) o primeiro, ocorrido nos dias 24 e 25 de dezembro de 2013, e ii) o segundo, nos dias 3 e 4 de janeiro de 2014.

No processo de verificação, foram selecionados três períodos adicionais em que se registaram valores elevados de escoamento no rio Mondego e que também causaram inundações em Coimbra. Os períodos de verificação consistiram nos eventos de cheia corridos em: i) janeiro de 2013, ii) março de 2013 e iii) fevereiro de 2014 (ver 4.5.2).

5.2.2.2. Processo de calibração

A calibração do modelo realizada no âmbito desta tese consistiu em definir os valores ótimos dos parâmetros de calibração para modelar corretamente o escoamento em regime natural observado nas linhas de água da bacia para diferentes estados hidrometeorológicos, possibilitando assim uma adequada previsão dos volumes afluentes em situações de cheia e, por conseguinte, a adequada aplicação do modelo à previsão operacional de cheias.

Conforme descrito em 3.2.2, o processo de calibração foi iniciado executando várias simulações para cada período temporal de 10 dias, alterando apenas os parâmetros CN e R, dentro dos intervalos previamente fixados (30 a 80 e 0,7 ou 0,9 respetivamente para os parâmetros CN e R). Os resultados das simulações foram depois comparados com os registos dos caudais observados no mesmo período, selecionando assim a combinação dos valores de CN e R que permite obter a simulação que melhor se adequa aos valores dos caudais observados. Ao mesmo tempo, as variáveis hidrometeorológicas estabelecidas para refletir o estado da humidade do solo – RV_{-5} , TP_{+3} e TP_{-60} – foram calculadas no início de cada período diário de simulação. Esta sequência foi então aplicada para todos os períodos de simulação, começando às 00:00 de cada dia do período de calibração.

Visão global dos resultados do processo de calibração

Os resultados finais do processo de calibração são apresentados: na Figura 60, para a secção da Aguieira, e na Figura 63, para a secção de Fronhas. Em cada uma das figuras, representam-se: na zona superior (Figuras 60a e 61a), os parâmetros de calibração ajustados (CN e R); na zona intermédia (Figuras 60b e 61b), o gráfico com as variáveis hidrometeorológicas RV_{-5} , TP_{+3} e TP_{-60} ; e na zona inferior (Figuras 60c e 61c), os valores dos indicadores de desempenho PBIAS e NS, calculados com os resultados das simulações realizadas com os parâmetros ajustados.

Conforme pode ser observado na Figura 60a, os parâmetros de calibração ajustados na secção da Aguieira assumem todos os valores dos intervalos definidos de valores discretos: CN varia entre 30 e 80 e R é igual a 0,7 ou 0,9. Na secção de Fronhas, como se mostra na Figura 61a, verifica-se a mesma situação para o parâmetro CN, mas o parâmetro R assume apenas o valor de 0,7 em todo o período.

Por outro lado, as variáveis hidrometeorológicas calculadas para as duas secções de controlo (ver Figura 60b e Figura 61b), evidenciam que, no período inicial (de 14 a 20 de dezembro de 2013), as

duas bacias de drenagem apresentavam um baixo grau de humidade no solo, que posteriormente aumentou devido à ocorrência de 3 eventos de precipitação significativos.

Adicionalmente, a maioria dos indicadores de desempenho das simulações (ver Figura 60c e Figura 61c) evidenciaram resultados bons ou satisfatórios: $NS > 0,50$ e $|PBIAS| < 25\%$. Os casos em que estes parâmetros exibiram resultados claramente piores – em particular o PBIAS – correspondem a situações nas quais os caudais observados são consistentemente muito reduzidos (menos do que $100 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção da Aguieira e menos de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção de Fronhas, o que corresponde a valores próximos dos caudais médios observados nos meses húmidos, de dezembro a março). Nestas situações, mesmo assumindo os valores mínimos para os parâmetros de calibração, o modelo sobrestima o caudal observado – os resultados das simulações do período de 14 a 19 de dezembro de 2013, principalmente na secção da Aguieira, são bons exemplos (ver Figura 60c). Porém, por definição, estas situações de baixos caudais não condicionam negativamente a capacidade de previsão de cheias.



Figura 60. Resultados do processo de calibração na secção da Aguieira: a) parâmetros de calibração ajustados (CN e R); b) variáveis hidrometeorológicas (RV_{-5} , TP_{+3} e TP_{-60}) estabelecidas para refletir o estado de humidade do solo; e c) indicadores de desempenho obtidos (PBIAS e NS). Os valores correspondentes são apresentados no Quadro A3.1 do Anexo 3.

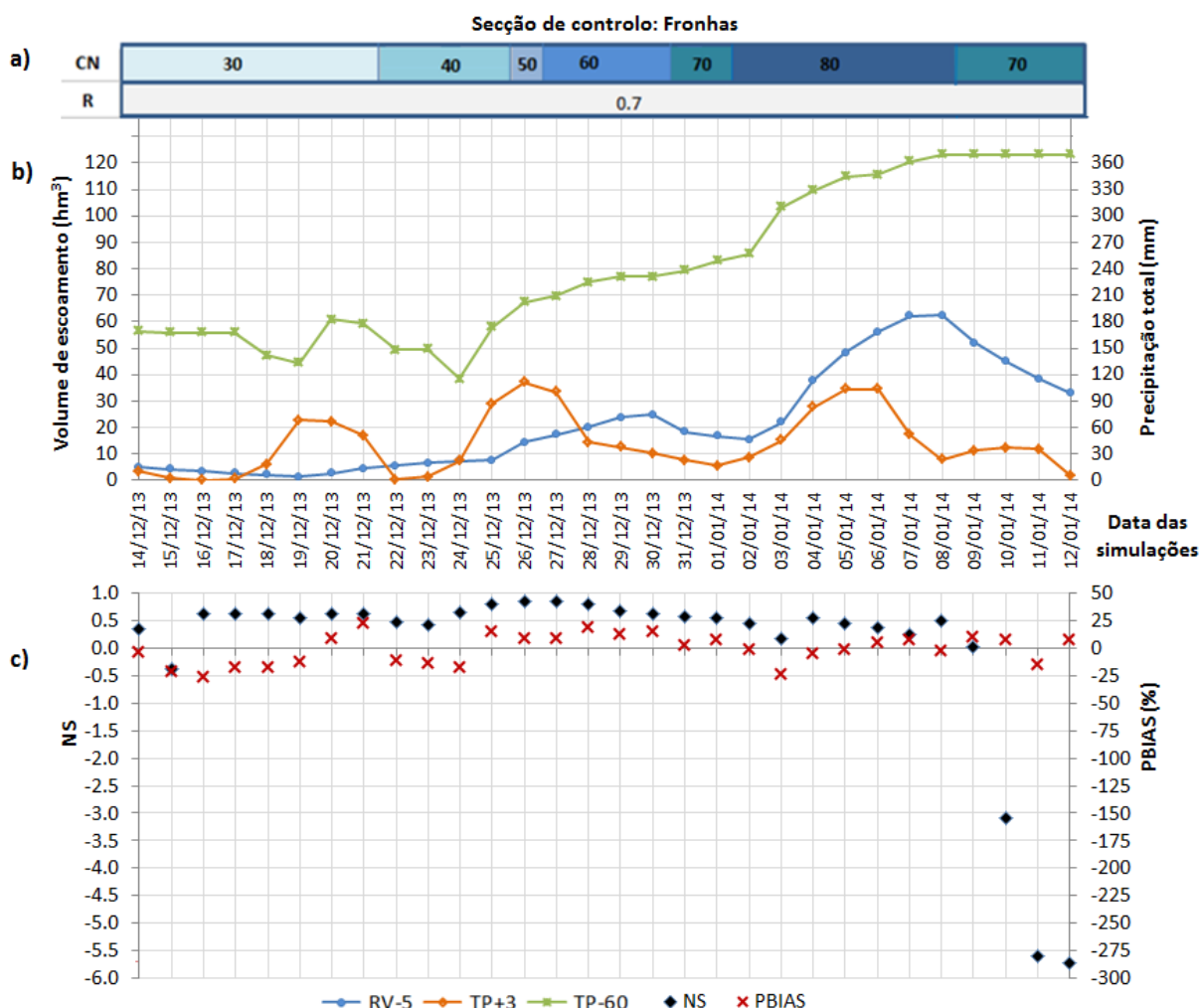


Figura 61. Resultados do processo de calibração na secção de Fronhas: a) parâmetros de calibração ajustados (CN e R); b) variáveis hidrometeorológicas (RV-5, TP+3 e TP-60) estabelecidas para refletir o estado de humidade do solo; e c) indicadores de desempenho obtidos (PBIAS e NS).

Nos Quadros A3.1 e A3.2 do Anexo 3 apresentam-se os valores correspondentes aos resultados apresentados, respetivamente, na Figura 60 e na Figura 61.

Exemplos do procedimento de calibração, aplicado na secção de controlo da Agueira

Para ilustrar o procedimento de calibração e explicar em maior detalhe os resultados obtidos, a Figura 62 exhibe, a título de exemplo, os resultados de simulações realizadas em 6 dias do período selecionado, na secção de controlo da Agueira. A legenda de cada um dos gráficos evidencia os parâmetros de calibração correspondentes a cada uma das simulações efetuadas, bem como os indicadores de desempenho assim obtidos (PBIAS e NS). As linhas pretas contínuas representam o caudal observado; as linhas vermelhas representam os resultados de simulações realizadas com os parâmetros calibrados; e as linhas restantes representam simulações alternativas efetuadas com valores diferentes dos parâmetros.

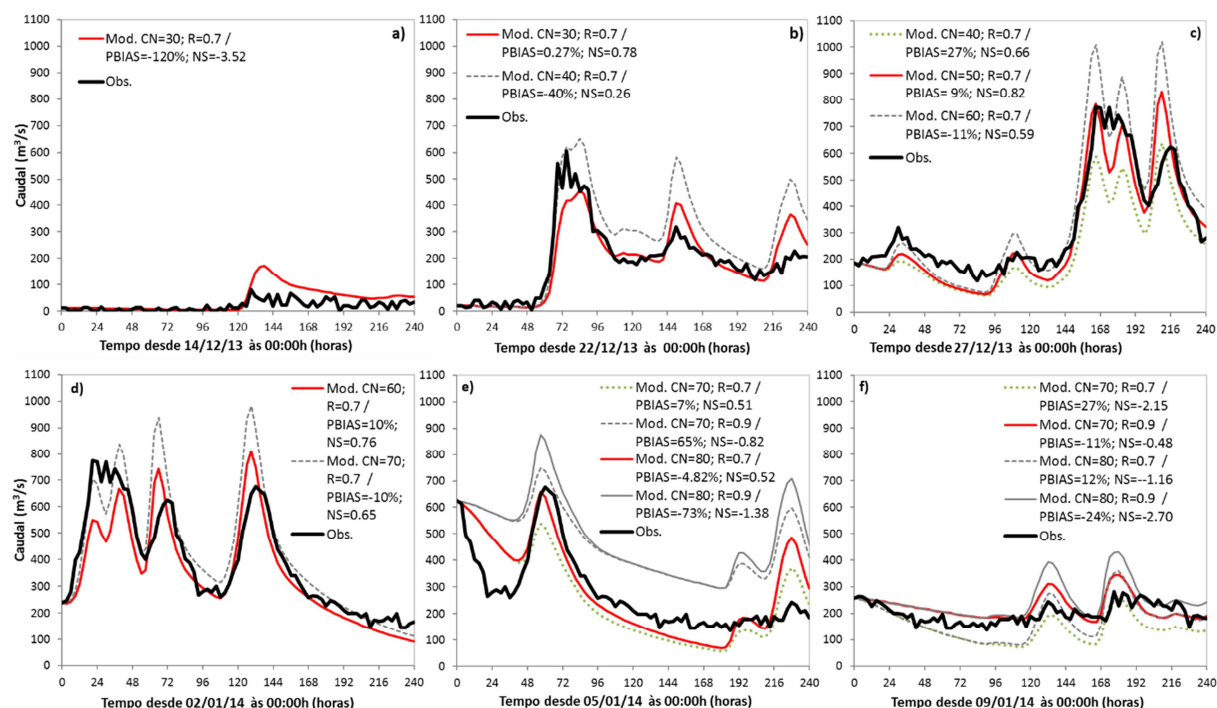


Figura 62. Comparação, na seção da Aguireira, dos valores do caudal observado (Obs.), com os resultados das simulações (Mod.) realizadas com distintos valores dos parâmetros de calibração CN e R, dentro do período de 10 dias iniciado às 00:00h do dia indicado no eixo das abcissas.

Para o período de 10 dias que se iniciou em 14 de dezembro de 2013 (Figura 62a), foi executada uma simulação com $CN=30$ e $R=0,7$, resultando num hidrograma que, em geral, sobrestima o observado (num cenário porém de baixos caudais, conforme descrito acima). Qualquer acréscimo nos valores dos parâmetros de calibração iria, portanto, agravar a sobrestimação do caudal observado. Por conseguinte, neste caso, os valores dos parâmetros que produzem o melhor ajuste são os valores mínimos do intervalo estabelecido para calibração. Apesar dos indicadores de desempenho traduzirem que a simulação não foi satisfatória ($PBIAS = 120\%$ e $NS = -3.52$), a comparação gráfica entre os resultados do modelo e o hidrograma observado evidencia que a simulação contém informação útil sobre a tendência do escoamento, possibilitando nomeadamente a previsão de um pequeno incremento de caudal no final do período de simulação.

O segundo exemplo, ilustrado na Figura 62b, corresponde ao período de simulação iniciado em 22 de dezembro de 2013, e inclui a cheia que ocorreu em 24 e 25 de dezembro de 2013. Como o período que antecedeu a data da simulação registou baixos níveis de escoamento, os valores do parâmetro que produziram o melhor ajuste foram idênticos aos do primeiro exemplo ($CN = 30$ e $R = 0,7$). Neste caso, ambos os indicadores de desempenho exibiram bons resultados ($PBIAS = 0,3\%$ e $NS = 0,78$).

Os gráficos c) e d) da Figura 62 correspondem às simulações iniciadas a 27 de dezembro de 2013 e a 2 de janeiro de 2014. Ambos os períodos de 10 dias incluem a cheia que ocorreu no início de janeiro de 2014. Devido à ocorrência de valores elevados do caudal nos dias anteriores (24 e 25 de dezembro de 2013) e à persistência de elevados níveis de precipitação, os parâmetros de calibração – em particular

o valor de CN – evidenciaram uma tendência de aumento. Por conseguinte, no processo de calibração destas simulações, foi obtido um valor de CN igual a 50 para a simulação referente ao dia 27 de dezembro de 2013 e de CN igual a 60 para a simulação referente ao dia 2 de janeiro de 2014. O valor de R permaneceu igual a 0,7 em ambos os casos, e ambos os indicadores de desempenho continuaram a evidenciar bons resultados (PBIAS = 9% e NS = 0,82 no primeiro caso, e PBIAS = 10% e NS = 0,76 no segundo caso).

A Figura 62e exibe as simulações iniciadas em 5 de janeiro de 2014. Neste exemplo, é apresentado o caso de uma simulação iniciada num pico do hidrograma – associado a um evento de precipitação previamente iniciado e que continuou a decorrer. Conforme pode ser observado, os resultados do modelo no início do período de simulação sobrestimaram, em geral, o caudal efetivamente observado. Isto deve-se ao facto do modelo incorporar apenas dados de entrada respeitantes ao período de simulação, e por defeito pressupor que o caudal inicial introduzido como condição inicial corresponde unicamente ao escoamento de base e não ao escoamento total. Noutros casos, se o início da simulação ocorre num pico do hidrograma, estando associado a um evento de precipitação que já terminou, o modelo não irá entrar em linha de conta com esse evento de precipitação no cálculo do escoamento direto, e os resultados iniciais da simulação poderão ser mais baixos do que os valores observados. Todavia, no exemplo aqui apresentado, os indicadores de desempenho obtidos foram satisfatórios (PBIAS = -5% e NS=0,52) quando aplicados à simulação realizada com a combinação de parâmetros que gerou o melhor ajuste no processo de calibração (CN=80 e R=0,7).

No último exemplo, apresentado na Figura 62f, o melhor ajuste foi obtido com CN igual a 70 e R igual a 0,9. Os indicadores de desempenho correspondentes a esta simulação fornecem diferentes indicações de ajustamento: de acordo com o PBIAS (-11%), a simulação não apresenta desvios significativos, evidenciando bons resultados; por outro lado, porém, o valor negativo de NS (-0,48) indica que a simulação não é satisfatória. Entretanto, apesar de ligeiros desvios, globalmente os dois hidrogramas são graficamente muito próximos. Por conseguinte, como a diferença no volume total de ambos os hidrogramas é reduzida (11%) e as diferenças pontuais nos caudais não são demasiado expressivas, a simulação pode ser considerada aceitável para aplicação na previsão de cheias.

Conclusões idênticas às acima apresentadas foram inferidas também no processo de calibração relativo à secção de controlo de Fronhas.

Critérios estabelecidos para o ajuste contínuo dos parâmetros de calibração

Conforme foi descrito na secção 3.2.2, após o ajuste dos parâmetros de calibração para cada período de simulação, os valores de CN foram correlacionados com os valores de $RV_{.5}$ e TP_{+3} correspondentes aos mesmos períodos, e os valores de R foram correlacionados com os valores de TP_{-60} . Na sequência da análise dos resultados do processo de calibração (para todas as simulações), foi estabelecido um conjunto de critérios para o ajuste dos parâmetros CN e R em cada uma das secções de controlo analisadas, os quais são apresentados nos Quadros 21 e 22.

Quadro 20. Critérios de ajuste dos parâmetros de calibração, CN e R, na secção da Aguieira.

RV₋₅ (hm³)	TP₊₃ (mm)	CN	TP₋₆₀ (mm)	R
RV ₋₅ < 30	-	30	TP ₋₆₀ ≤ 370	0,7
30 ≤ RV ₋₅ < 70	-	40		
70 ≤ RV ₋₅ < 80	-	50		
80 ≤ RV ₋₅ < 130	-	60		
130 ≤ RV ₋₅ < 200	TP ₊₃ < 70	70	TP ₋₆₀ > 370	0,9
	TP ₊₃ ≥ 70	80		
RV ₋₅ ≥ 200	-	80		

Quadro 21. Critérios de ajuste dos parâmetros de calibração, CN e R, na secção de Fronhas.

RV₋₅ (hm³)	TP₊₃ (mm)	CN	TP₋₆₀ (mm)	R
RV ₋₅ < 5	-	30	TP ₋₆₀ ≤ 370	0,7
5 ≤ RV ₋₅ < 10	-	40		
10 ≤ RV ₋₅ < 15	-	50		
15 ≤ RV ₋₅ < 30	TP ₊₃ < 30	60		
	30 ≤ TP ₊₃ < 100	70	TP ₋₆₀ > 370	0,9
	TP ₊₃ ≥ 100	80		
RV ₋₅ ≥ 30	-	80		

No entanto, como no processo de calibração não foi realizado nenhum ajuste na secção de Fronhas com o parâmetro R igual a 0,9, admitiu-se que o parâmetro R terá o mesmo critério de ajuste nas duas secções de controlo. Tal consideração baseou-se no facto da variável TP₋₆₀ calculada para a secção de Fronhas não ter ultrapassado os 370 mm, que é o valor a partir do qual se estabeleceu que, para a secção da Aguieira, o parâmetro R deverá passar a ser 0,9. Esse critério foi estabelecido porque, nas simulações iniciadas no período de 9 a 12 de janeiro de 2014, se concluiu que o melhor ajuste desse parâmetro, para a secção da Aguieira, foi realizado com o valor igual a 0,9, sendo os valores correspondentes da variável TP₋₆₀ nessa secção superiores a 370 mm (ver Figura 60).

Os critérios de ajuste assim estabelecidos foram depois validados através do processo de verificação descrito em 3.2.2.3 e cujos resultados são seguidamente apresentados.

5.2.2.3. Verificação dos resultados

Para validar os resultados do processo de calibração, os critérios de ajuste definidos no Quadro 20 e no Quadro 21 foram aplicados à simulação de três períodos de cheia, que corresponderam aos maiores valores de caudal de ponta registados no período que decorreu entre janeiro de 2010 e março de 2013. Como o objetivo desta abordagem é ajustar os parâmetros de calibração diariamente de forma a

atualizar o modelo para refletir as alterações das condições meteorológicas e hidrológicas da bacia, foram analisadas as simulações iniciadas nos 3 dias consecutivos antes de cada um desses picos de cheia.

Na Figura 63 e na Figura 64 representam-se, respetivamente para as secções da Aguieira e de Fronhas, os hidrogramas resultantes das 9 simulações realizadas (3 eventos; 3 simulações para cada evento), contrapostos com os respetivos hidrogramas observados. A legenda de cada um dos gráficos evidencia os parâmetros de calibração correspondentes a cada uma das simulações efetuadas, bem como os indicadores de desempenho assim obtidos (PBIAS e NS). As linhas pretas contínuas representam o caudal observado; as linhas cinzentas e a tracejado representam os resultados das simulações realizadas com os parâmetros de calibração obtidos através dos critérios anteriormente enunciados.

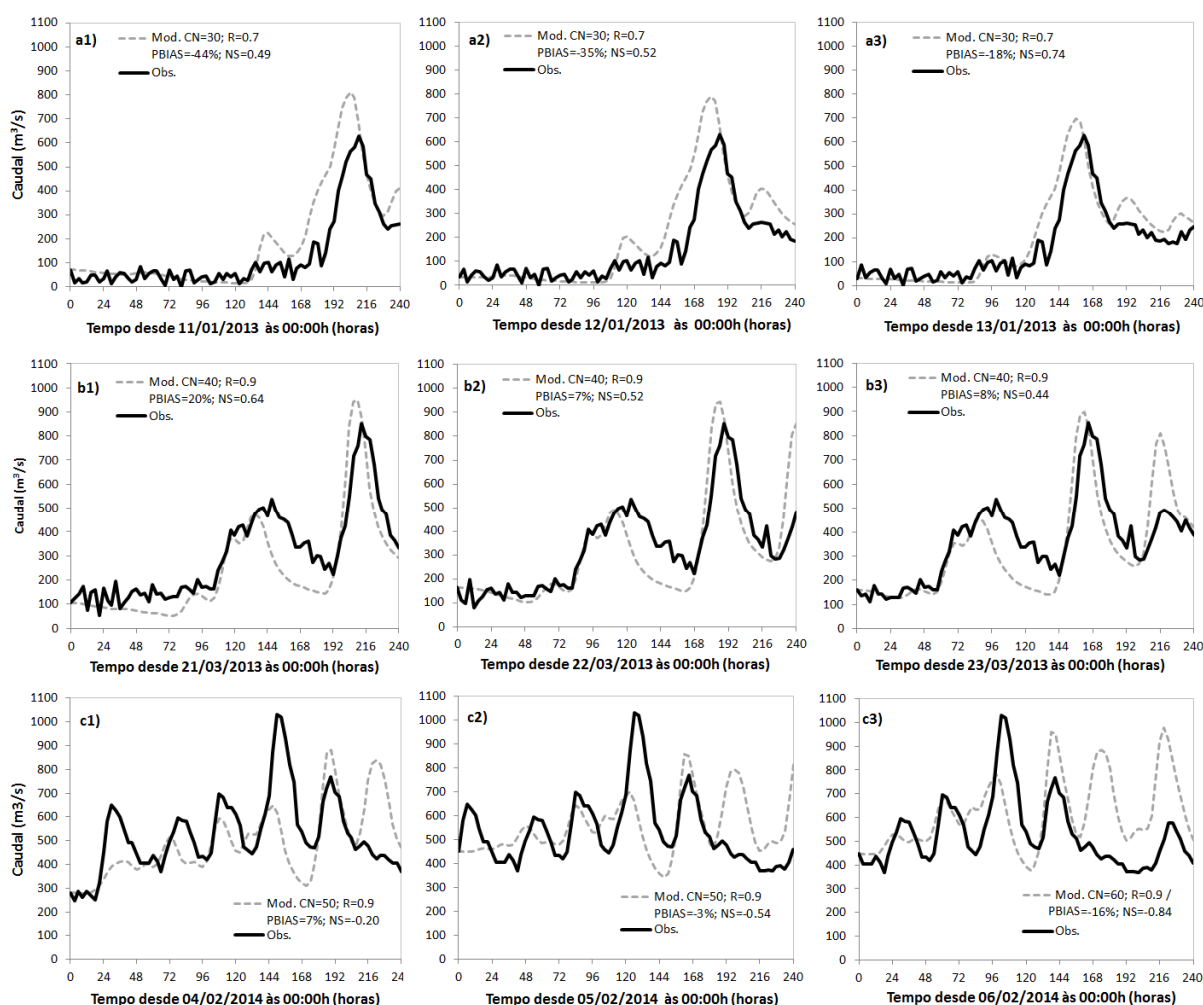


Figura 63. Comparação, na secção da Aguieira, dos valores do caudal observado (Obs.) com os resultados das simulações (Mod.) realizadas com os parâmetros de calibração CN e R definidos pelos critérios apresentados no Quadro 20, dentro do período de 10 dias iniciado às 00:00h dos dias indicados no eixo das abcissas.

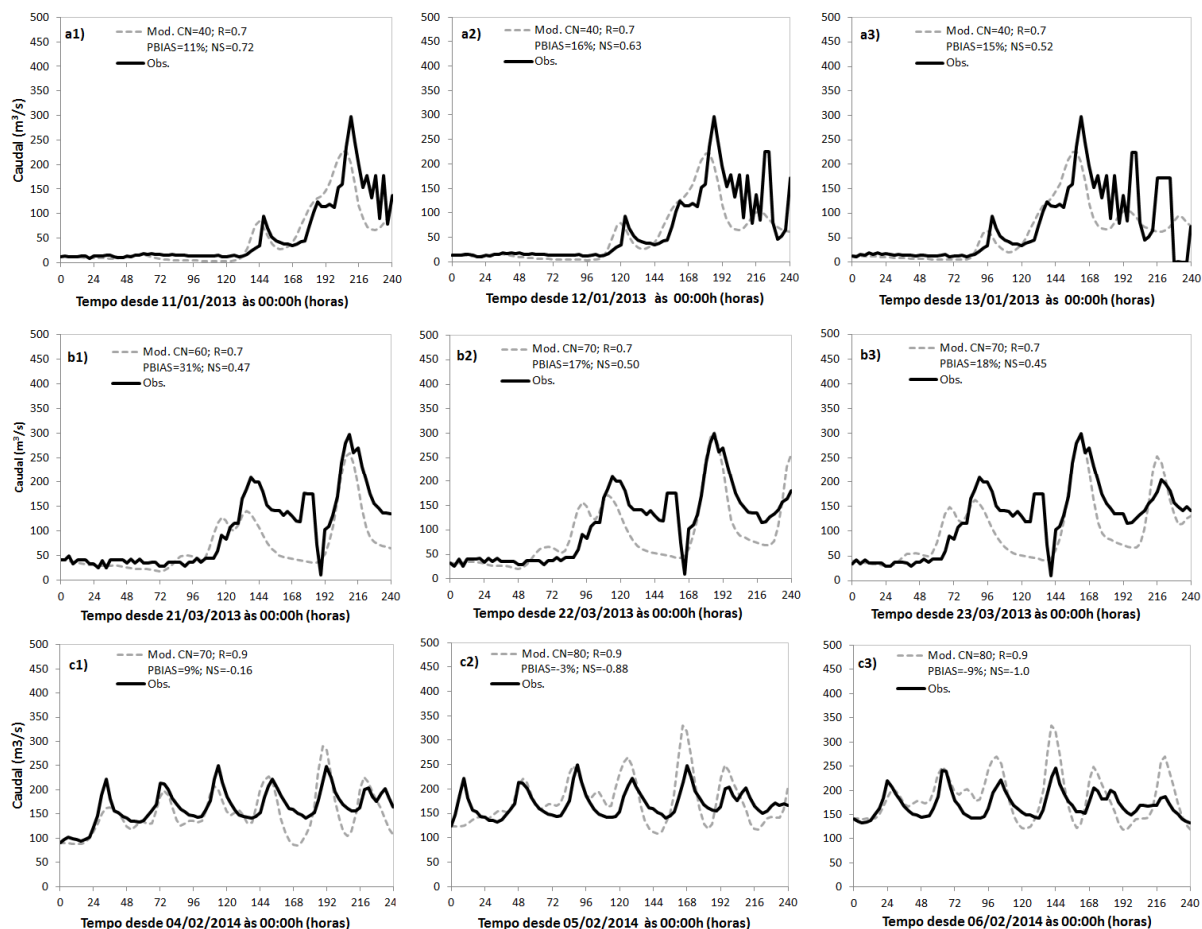


Figura 64. Comparação, na secção de Fronhas, dos valores do caudal observado (Obs.) com os resultados das simulações (Mod.) realizadas com os parâmetros de calibração CN e R definidos pelos critérios apresentados no Quadro 21, dentro do período de 10 dias iniciado às 00:00h dos dias indicados no eixo das abcissas.

Analisando a Figura 63 e a Figura 64 pode ser inferido que o modelo construído e calibrado através da metodologia proposta permite a previsão das ocorrências de caudais de cheia nos 10 dias subsequentes, e que, em muitos casos, a qualidade da previsão melhora à medida que o início da simulação se aproxima do pico do hidrograma.

A melhoria progressiva da previsão do pico de cheia é claramente evidenciada nos exemplos apresentados nos gráficos a1), a2) e a3) da Figura 63, que exibem os resultados, relativos à secção da Aguieira, das simulações realizadas para a previsão da cheia que ocorreu entre 19 e 20 de janeiro de 2013. Nessas 3 simulações diárias consecutivas, os indicadores de desempenho melhoraram e o valor correspondente ao pico de cheia foi gradualmente ajustado.

Relativamente aos resultados das simulações correspondentes na secção de Fronhas, apresentados nos gráficos a1), a2) e a3) da Figura 64, apesar de não se observar a mesma tendência na melhoria nos indicadores de desempenho, os valores obtidos correspondem a resultados satisfatórios.

Nos gráficos b1), b2) e b3) das referidas Figuras 63 e 64, que representam o evento de cheia ocorrido no final de março de 2013, apesar dos valores do indicador NS exibirem, em ambos os casos, uma

ligeira tendência decrescente, permanecem num intervalo de valores próximo do limite satisfatório (valores próximos de 0,5), enquanto o PBIAS evidencia uma relevante melhoria de 21 para 22 de março de 2013, apresentando igualmente resultados satisfatórios.

Relativamente aos gráficos c1), c2) e c3) de ambas as figuras anteriormente referidas (63 e 64), a análise gráfica indica que as simulações não representam satisfatoriamente a variação no caudal observado, asserção que é igualmente confirmada pelos valores do indicador NS (valores muito abaixo de 0,5). Porém, os indicadores PBIAS evidenciaram bons resultados (valores absolutos inferiores a 15%), indiciando que as diferenças em termos de volume total, entre os hidrogramas observados e os hidrogramas resultantes das simulações, foram reduzidas. Portanto, e apesar de no caso deste evento – em que ocorreram vários picos de cheia muito próximos – o modelo não ter sido capaz de simular corretamente a variação do caudal ao longo do tempo, foi obtida uma boa estimativa global dos volumes totais dos hidrogramas afluentes às duas secções de controlo do modelo hidrológico.

Sublinhe-se que, para além do instante de ocorrência de um pico de cheia, o conhecimento do volume total do escoamento de cheia nos 10 dias subsequentes é tão ou mais importante para a previsão de cheias, possibilitando o acionamento prévio de medidas operacionais para minimizar os seus impactos.

No seguimento do exposto, considerou-se que a metodologia de calibração proposta e os critérios estabelecidos para ajuste diário dos parâmetros CN e R são adequados para aplicação do modelo na previsão operacional de cheias nas secções das barragens da Aguieira e de Fronhas.

Nos Quadros A3.3 e A3.4 do Anexo 3 apresentam-se, para cada secção de controlo: os valores correspondentes às variáveis hidrometeorológicas de referência calculados no início de cada uma das simulações descritas e apresentadas, respetivamente, na Figura 63 e na Figura 64; os respetivos valores dos parâmetros de calibração, ajustados de acordo com os critérios fixados anteriormente em 5.2.2.2; e, os correspondentes indicadores de desempenho obtidos.

5.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS DE PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO

A partir do servidor do ECMWF (designado por MARS), foram descarregados os dados das previsões de precipitação total, correspondentes às 51 previsões ou membros do ENS e à previsão HRES, realizadas às 00h de cada dia do período compreendido entre 01/03/2010 e 28/02/2014. Foi escolhido este período de modo: i) a serem utilizadas previsões de precipitação obtidas, na sua totalidade, com as mesmas versões do modelo de previsão do ECMWF (ver 3.3.1), ii) a haver uma correspondência temporal com os registos horários fornecidos pela EDP (ver 4.6) e iii) a permitir analisar um conjunto de dados constituído por ciclos anuais completos, neste caso, de 4 anos.

Posteriormente foram também descarregados os dados relativos ao período de 2 a 13/01/2016 (12 dias), para simular a cheia ocorrida nesse período.

Na Figura 65 representam-se as células pelas quais se encontram distribuídos os dados de previsão de precipitação do ECMWF utilizados na presente tese (ver 3.3.1): à esquerda, as 21 células relativas aos dados ENS e, à direita, as 68 células dos dados HRES, que intercetam a bacia do rio Mondego.

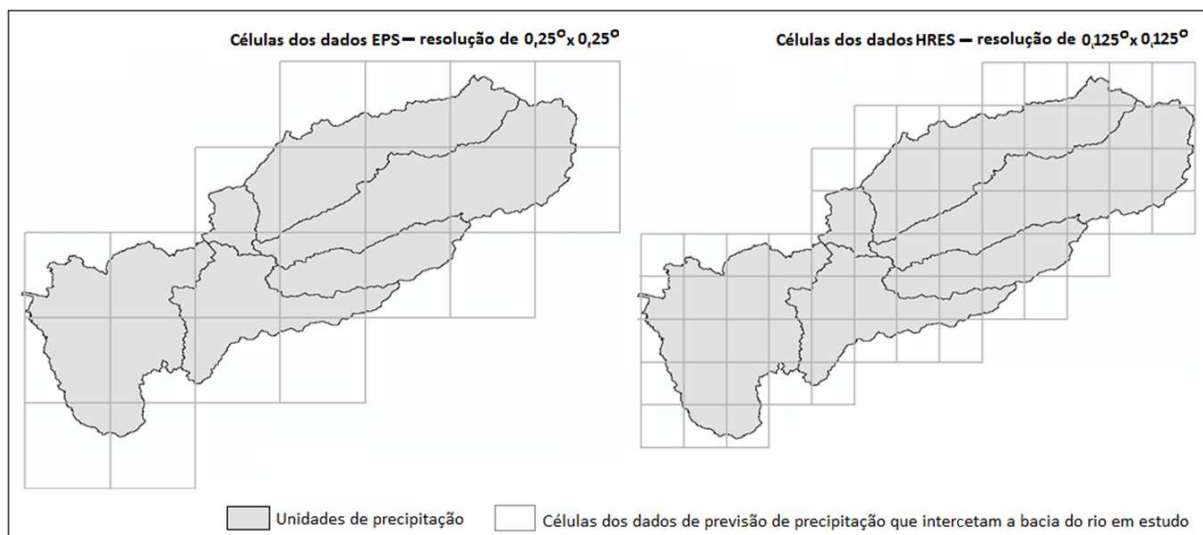


Figura 65. Representação das células que intercetam a bacia do rio Mondego, correspondentes a ambos os tipos de dados de precipitação utilizados: i) à esquerda: grelha dos dados de previsão do ENS com 0,25 graus decimais de resolução espacial e, ii) à direita: grelha dos dados do HRES, com 0,125 graus decimais de resolução espacial.

O processamento dos dados de previsão de precipitação seguiu o procedimento descrito em 3.3.2.

Uma vez que neste caso se estabeleceu que a entrada dos dados de precipitação no modelo hidrológico se corporiza nas 6 unidades de precipitação, e não em cada uma das 27 sub-bacias definidas (ver 5.2.1.3), os 2 tipos de dados de previsão de precipitação, com resoluções espaciais distintas, foram convertidos para as unidades de precipitação, utilizando o método de interpolação espacial baseado na ponderação das áreas correspondentes.

Os dois tipos de dados de previsão de precipitação (ENS e HRES) correspondem à precipitação acumulada, em milímetros, em períodos de 3 horas até às 144 horas de previsão e em períodos de 6 horas, a partir desse instante. Como se pretende utilizar o modelo hidrológico para realizar previsões de caudais com alcance temporal de 240 horas e com um passo de cálculo de 3 horas, colocaram-se todos os dados em intervalos regulares de 3 horas, dividindo cada um dos dados dos períodos superiores em dois, com metade do valor original.

5.4. SIMULAÇÃO E PREVISÃO HIDROLÓGICA

Incorporando os dados diários das previsões de precipitação do ECMWF – as 51 previsões ou membros do ENS e a previsão HRES – no modelo hidrológico calibrado, dia a dia, através dos critérios definidos em 5.2.2.2, são executadas 52 simulações com uma extensão temporal de 240 horas

e um intervalo de análise de 3 horas, obtendo-se dessa forma um conjunto de 52 previsões (ou uma previsão por *ensemble*, com 52 membros) de caudais afluentes em regime natural a cada uma das secções de referência das sub-bacias definidas no modelo hidrológico.

Esse processo foi aplicado a todos os dias do período compreendido entre 01/03/2010 e 28/02/2014 (ver 5.3), tendo-se executado 75972 simulações hidrológicas (1461 dias x 52 simulações/dia) e obtido 1461 previsões por *ensemble* para cada secção de referência do modelo. De igual forma, foram depois realizadas as simulações hidrológicas para o período de 2 a 13/01/2016 (13 dias), cujos resultados foram somente utilizados para avaliação do modelo de gestão de albufeiras descrito no Capítulo 6, uma vez que esse período ocorreu já muito próximo do final da realização da presente tese.

Conforme descrito em 3.4., cada uma das previsões de caudais por *ensemble* foi depois analisada estatisticamente e, para cada período de previsão – intervalos de 3 horas entre as 0h e as 240 horas, correspondendo a 81 instantes –, calcularam-se os valores médio e máximo do caudal previsto para esse instante e os percentis 25, 50, 75, 90 e 98 dessas previsões. Desta forma, cada conjunto de 52 previsões de caudais (previsão probabilísticas) foi traduzido num conjunto de apenas 7 previsões determinísticas.

5.5. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DAS PREVISÕES HIDROLÓGICAS

A análise e verificação das previsões de caudais por *ensemble* foram efetuadas para as secções de controlo – Aguireira e Fronhas – por serem os pontos da bacia onde estavam disponíveis registos de caudais afluentes em regime natural, os quais são necessários para a verificação das previsões. Além disso, como se poderá verificar no capítulo 6, a previsão dos caudais afluentes a essas secções poderá contribuir significativamente para a melhoria da gestão operacional das albufeiras correspondentes. Portanto, nesse contexto, a verificação das previsões é de uma grande importância para perceber qual é o grau de confiança que se pode esperar das mesmas.

Dada a dispersão e a incerteza existentes nas previsões por *ensemble*, a análise das previsões aqui realizada teve também como objetivo seleccionar uma previsão de referência para a tomada de decisões na gestão das albufeiras, nomeadamente em situações de cheia (ver 3.5).

O processo de análise e verificação foi realizado para o período de 4 anos compreendido entre 01/03/2010 e 28/02/2014, e baseou-se na avaliação da consistência e da qualidade das previsões de caudais executadas para cada dia desse período, conforme descrito na secção 3.5 da metodologia geral. De seguida, apresenta-se a análise gráfica realizada para avaliar, de uma forma visual e simplificada, essas duas características – consistência e qualidade – das previsões de caudais por *ensemble* correspondentes a duas cheias ocorridas nesse período em Coimbra. Posteriormente, apresenta-se uma avaliação mais abrangente – realizada para todo o período – e consequentemente mais sustentada de cada uma dessas características, realizada através das medidas e dos processos estatísticos pré-estabelecidos na secção 3.5.

5.5.1. ANÁLISE GRÁFICA

A análise gráfica aqui apresentada foi realizada para as previsões associadas às duas maiores cheias registadas no período de análise, ocorridas em março de 2013 e fevereiro de 2014 (ver 4.5.2). Para cada um desses eventos, foram analisadas as previsões realizadas nos 6 dias anteriores à ocorrência dos respetivos picos de cheia.

Na Figura 66 e na Figura 67 apresentam-se hidrogramas previstos e observados, na secção da Aguireira e de Fronhas, para os períodos de cheia analisados. Em cada gráfico, as linhas cinzentas representam os vários membros da previsão de caudais por *ensemble*, realizada num dia específico (indicado na legenda do eixo das abcissas), para os 10 dias seguintes; a linha preta corresponde ao hidrograma observado no mesmo período.

Analisando apenas o grau de dispersão dos membros das previsões por *ensemble* nos vários gráficos da Figura 66 e da Figura 67, observa-se que, em geral, a dispersão aumenta com o período de previsão, sendo notório que, na maioria dos casos, até 48 a 72 horas de período de previsão, os membros apresentam valores previstos muito próximos, e que a partir desse ponto a dispersão aumenta significativamente. Esta análise simples permite inferir que as previsões são, em geral, mais consistentes até às 72 horas de previsão, e que a partir daí perdem consistência.

Por seu turno, a análise da qualidade das previsões é efetuada através da comparação dos conjuntos de hidrogramas previstos com os observados. Dessa forma, a análise aqui efetuada teve em conta essencialmente os seguintes aspetos: i) a capacidade de prever a ocorrência, bem como o valor ou magnitude, do pico da cheia; e ii) o posicionamento gráfico das observações (hidrogramas observados) relativamente aos membros das previsões de caudais por *ensemble* correspondentes.

Em relação ao primeiro aspeto, observa-se que a ocorrência dos picos de cheia nos dois períodos analisados é, de uma forma geral, prevista com pelo menos 6 dias de antecedência, e que a consistência dessa previsão aumenta à medida que a data da previsão se aproxima da respetiva data de ocorrência. No entanto, no que respeita à previsão da magnitude do pico de cheia, essa tendência não se verifica de forma uniforme em todos os casos analisados. Por exemplo, analisando os gráficos relativos ao evento ocorrido em março de 2013 na secção de Fronhas – gráficos da direita na Figura 66 – observa-se que, nesse caso, a qualidade da previsão de cheia diminui com a aproximação da data da sua ocorrência, uma vez que ao longo dos dias representados os membros das previsões por *ensemble* se situam cada vez mais abaixo das observações. No entanto, e apesar da aparente tendência decrescente da qualidade das previsões relativas a esse caso, a previsão realizada no dia 29/03/2013 (dia mais próximo do pico de cheia) apresenta uma diferença ainda mais acentuada entre o pico dos hidrogramas previstos e do hidrograma observado, porque o valor introduzido no modelo hidrológico como caudal inicial era muito reduzido, o que aparentemente não deverá corresponder à realidade (e deverá antes representar um erro de medição), dada a gama de caudais mais elevados registados nesse período.

Quanto à posição das observações relativamente aos membros das previsões por *ensemble*, a situação que revela uma melhor qualidade de previsão consiste naquela em que as observações se situam dentro da distribuição dos membros do *ensemble*. No entanto, como se pode verificar, principalmente na

Figura 66, tal acontece com mais facilidade quando a dispersão dos membros é maior e consequentemente a consistência é menor, ou seja, acontece mais frequentemente para os períodos de previsão mais alargados.

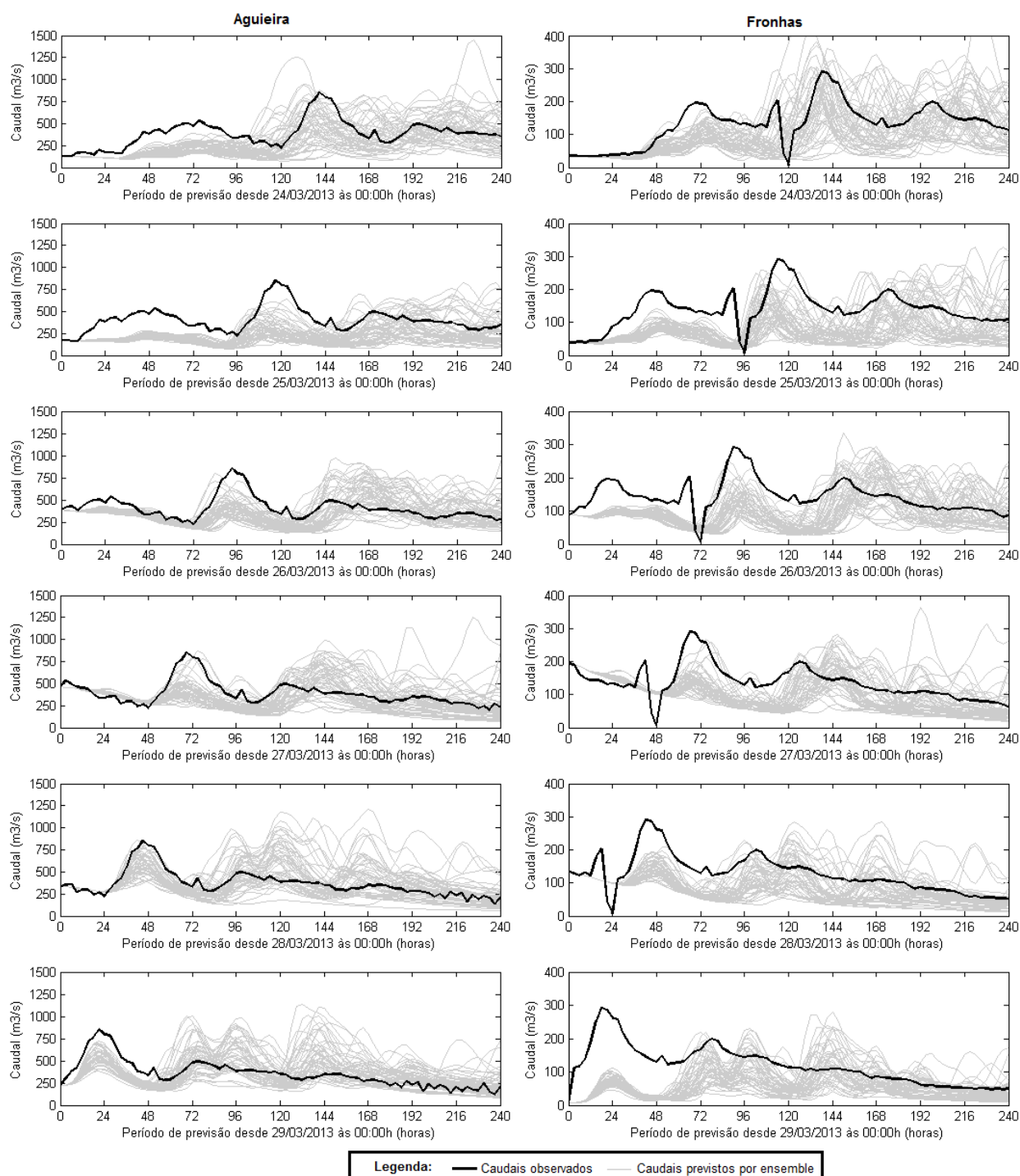


Figura 66. Comparação das previsões de caudais por *ensemble* realizadas nos 6 dias anteriores à cheia ocorrida a 30 de março de 2013, com os correspondentes caudais observados: i) na secção da Aguieira, representada à direita, e ii) na secção de Fronhas, à esquerda.

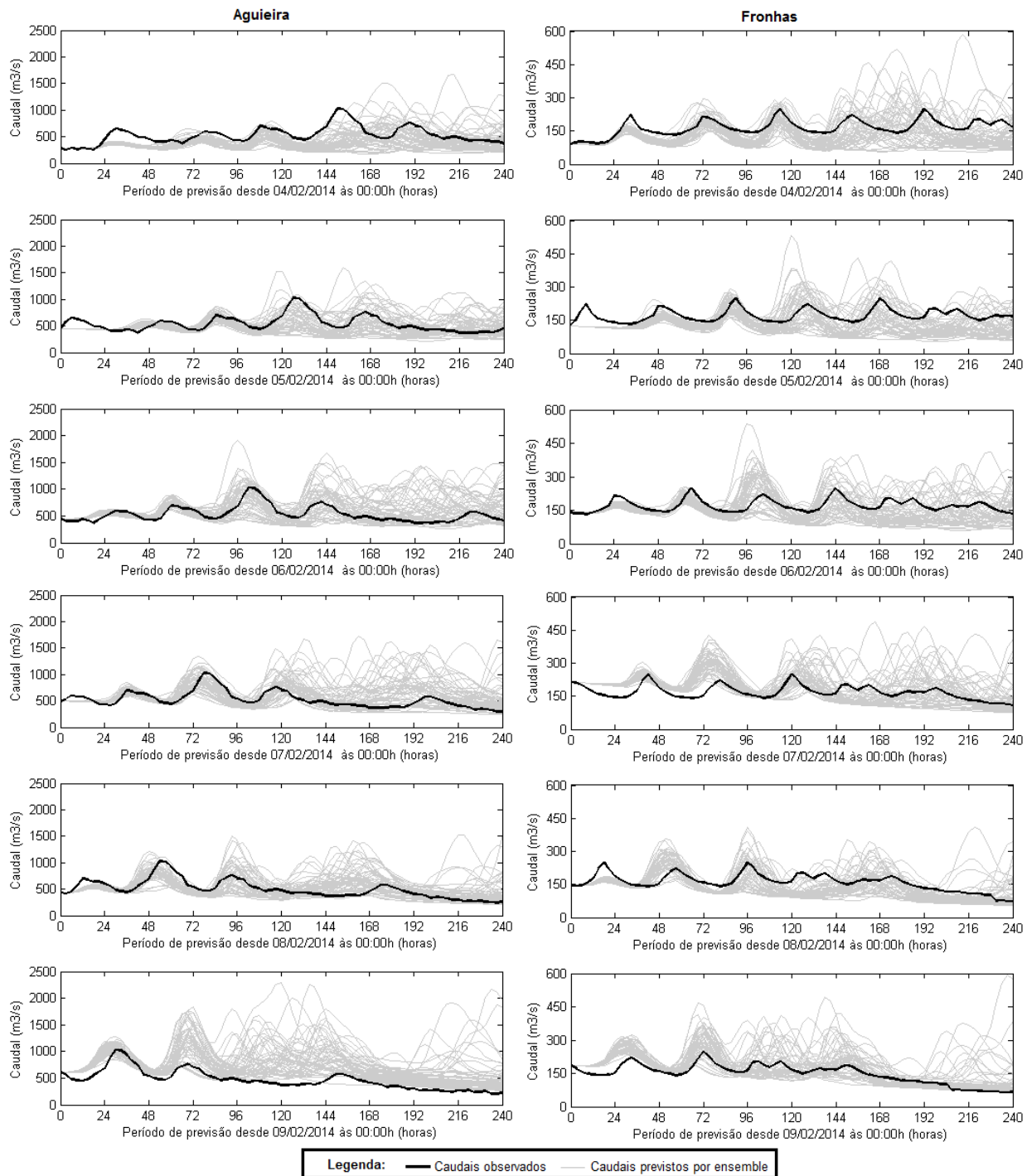


Figura 67. Comparação das previsões de caudais por *ensemble* realizadas nos 6 dias anteriores à cheia ocorrida a 10 de fevereiro de 2014, com os correspondentes caudais observados: i) na secção da Aguieira, representada à direita, e ii) na secção de Fronhas, à esquerda.

5.5.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CONSISTÊNCIA

Conforme descrito na metodologia (ver 3.5.1), a propriedade estatística da consistência das previsões de caudais foi avaliada através da análise da dispersão do conjunto de previsões para cada secção de controlo, considerando duas perspetivas distintas: i) avaliando a concordância das previsões por *ensemble* realizadas num mesmo instante (dia) e ii) avaliando a concordância das previsões por *ensemble* realizadas em dias consecutivos.

Para avaliar estatisticamente a consistência pela primeira perspetiva, foi calculado o desvio padrão, por período de previsão, em cada uma das duas secções de controlo do modelo, para todas as previsões de caudais por *ensemble* realizadas (ver 5.4.). Na Figura 68 apresentam-se os valores médios e máximos dos desvios padrão obtidos para cada período de previsão, para as secções: a) da Aguieira e b) de Fronhas.

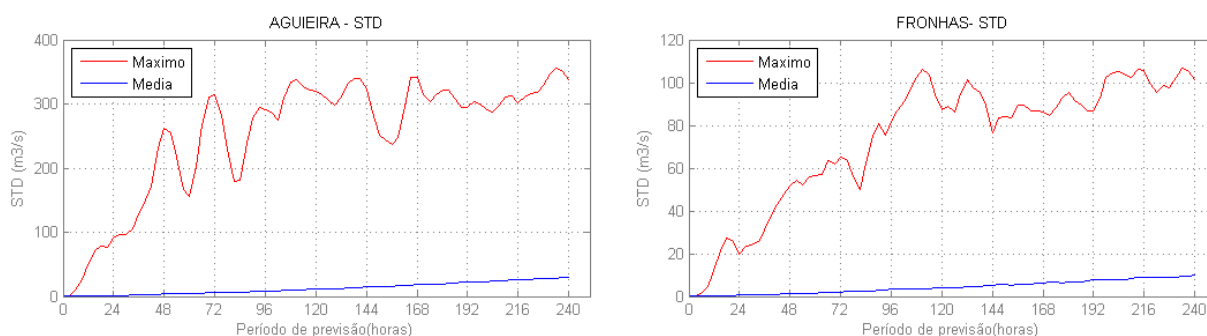


Figura 68. Valores médios (a azul) e máximos (a vermelho) dos desvios padrão obtidos para cada período de previsão, para: a secção da Aguieira – à esquerda; e a secção de Fronhas – à direita.

Os resultados apresentados na Figura 68 permitem caracterizar a dispersão dos membros das previsões por *ensemble* ao longo do período de previsão. Como se pode observar nos dois gráficos dessa figura, e de forma congruente com a análise gráfica efetuada, o desvio padrão aumenta com o período de previsão. Em termos de valor médio, o crescimento é sensivelmente linear. Em termos de valor máximo, não se observa qualquer tipo de tendência.

Com base na segunda perspetiva, foi calculado o desvio-padrão médio, por período de previsão, para cada uma das duas secções de controlo, entre as previsões realizadas num determinado momento t e as previsões realizadas em cada um dos três dias anteriores, para o mesmo período temporal de avaliação. Na Figura 69 e na Figura 70 apresentam-se os resultados desta avaliação, considerando os valores médios e máximos dos conjuntos, respetivamente.

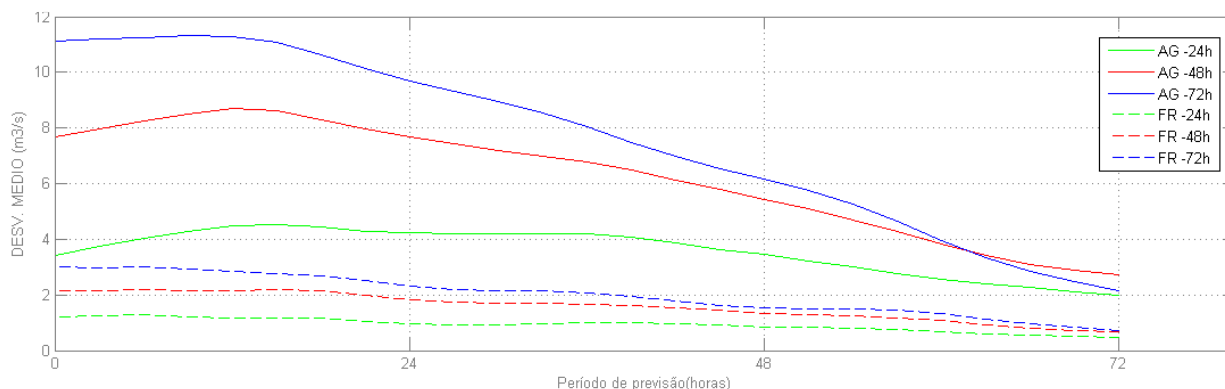


Figura 69. Desvio-padrão médio das previsões, realizadas num determinado dia t , em relação às previsões efetuadas nos 3 dias anteriores (considerando os valores médios dos conjuntos): $P(t)-P(t-x)$, com t a variar de 1 a 3. Análise para as secções da Aguieira (AG) e de Fronhas (FR).

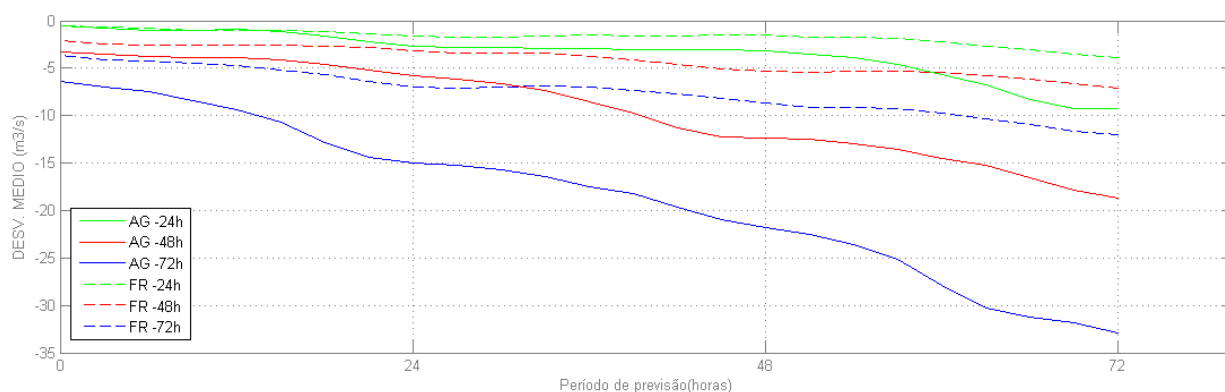


Figura 70. Desvio-padrão médio das previsões, realizadas num determinado dia t , em relação às previsões efetuadas nos 3 dias anteriores (considerando os valores máximos dos conjuntos): $P(t)-P(t-x)$, com t a variar de 1 a 3. Análise para as secções da Aguieira (AG) e de Fronhas (FR).

Na Figura 69, referente às previsões médias, observa-se que as previsões mais recentes são mais consistentes com a previsão atual, i.e., a previsão realizada no dia t para os 3 dias seguintes é, em média, mais consistente com a previsão realizada no dia $t-1$, para os mesmos dias, do que a realizada no dia $t-2$ e no dia $t-3$. A consistência das previsões consecutivas aumenta com o tempo até às 72h (o desvio ao longo do período de previsão representado na Figura 69).

Na Figura 70, referente às previsões máximas, observa-se também que as previsões mais recentes são mais consistentes com a previsão atual, mas como os desvios são negativos, a previsão máxima obtida no dia t para os 3 dias seguintes é menor que as previsões máximas obtidas nos dias $t-1$, $t-2$ e $t-3$ para os mesmos dias. No entanto, em relação aos valores máximos das previsões, conclui-se que a consistência das previsões consecutivas aumenta com o tempo até às 72h (o desvio absoluto aumenta com ao longo do período de previsão representado na Figura 70).

5.5.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA QUALIDADE

Para avaliação da qualidade das previsões foram utilizadas os métodos (medidas e processos) estatísticos pré-selecionados (ver secção 3.5.2), que foram aplicados através do programa EVS (ver 2.4.2).

Para a realização das análises focadas na excedência de um determinado limiar – como é o caso da utilização do Brier Score ou dos diagramas *Rank Histogram* e ROCD (ver 3.5.2) – foram considerados limiares de cheia com interesse para a gestão das albufeiras, estabelecendo-se para tal os valores dos caudais correspondentes aos valores médios registados nos meses húmidos (de dezembro a março) e à capacidade de vazão máxima dos órgãos de descarga de cada uma das albufeiras que, por regra, são os primeiros a serem utilizados em caso de cheia. Desta forma, definiram-se os seguintes limiares:

- para a secção da Aguieira:
 - limiar de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ – que corresponde ao valor médio do caudal afluente registado nesta secção nos meses de dezembro a março do período de análise;
 - limiar de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ – que corresponde aproximadamente à capacidade máxima de vazão do circuito hidráulico das turbinas;
- para a secção de Fronhas:
 - limiar de $30 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde ao valor médio do caudal afluente registado nesta secção nos meses de dezembro a março do período de análise, e corresponde também à capacidade máxima de vazão do túnel de transvase da albufeira (ver 4.4).
 - limiar de $125 \text{ m}^3/\text{s}$ – que corresponde aproximadamente à capacidade máxima de vazão de uma descarga de fundo, que é utilizada como órgão de descarga em caso de cheias.

Estes limiares foram usados também na análise dos restantes métodos de avaliação da qualidade das previsões, para avaliar o desempenho das previsões especificamente em cenários de ocorrência de valores mais elevados de caudais, excluindo da aplicação desses métodos estatísticos os dados correspondentes aos valores observados inferiores aos limiares definidos. Esses métodos foram então aplicados para toda a série de dados e para dois subconjuntos de dados definidos através dos limiares acima estabelecidos. Em qualquer dos casos, esses métodos – quando aplicados com o programa EVS – comparam a média das previsões com o valor observado, para um determinado período de previsão.

Como os diagramas *Rank Histogram* e ROCD geram, cada um, um gráfico para cada período de previsão, foram escolhidos apenas 4 instantes para a apresentação dos respetivos resultados: 24h, 72h, 120h e 240h.

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação dos vários métodos referidos, ao longo do período de previsão, para as duas secções seleccionadas.

5.5.3.1. Mean Absolute Error (Erro Médio Absoluto)

Os resultados obtidos para a medida estatística MAE – que corresponde ao erro médio absoluto – em cada uma das secções analisadas são apresentados na Figura 71. Nessa figura e nas duas figuras

seguintes, os pontos a vermelho correspondem à medida calculada com a totalidade dos dados do período de análise; os pontos a azul e a verde correspondem às medidas calculadas com menores amostras de dados, correspondendo a considerar apenas as ocorrências de caudais acima de determinados limiares, que estão definidos na legenda com a correspondente cor.

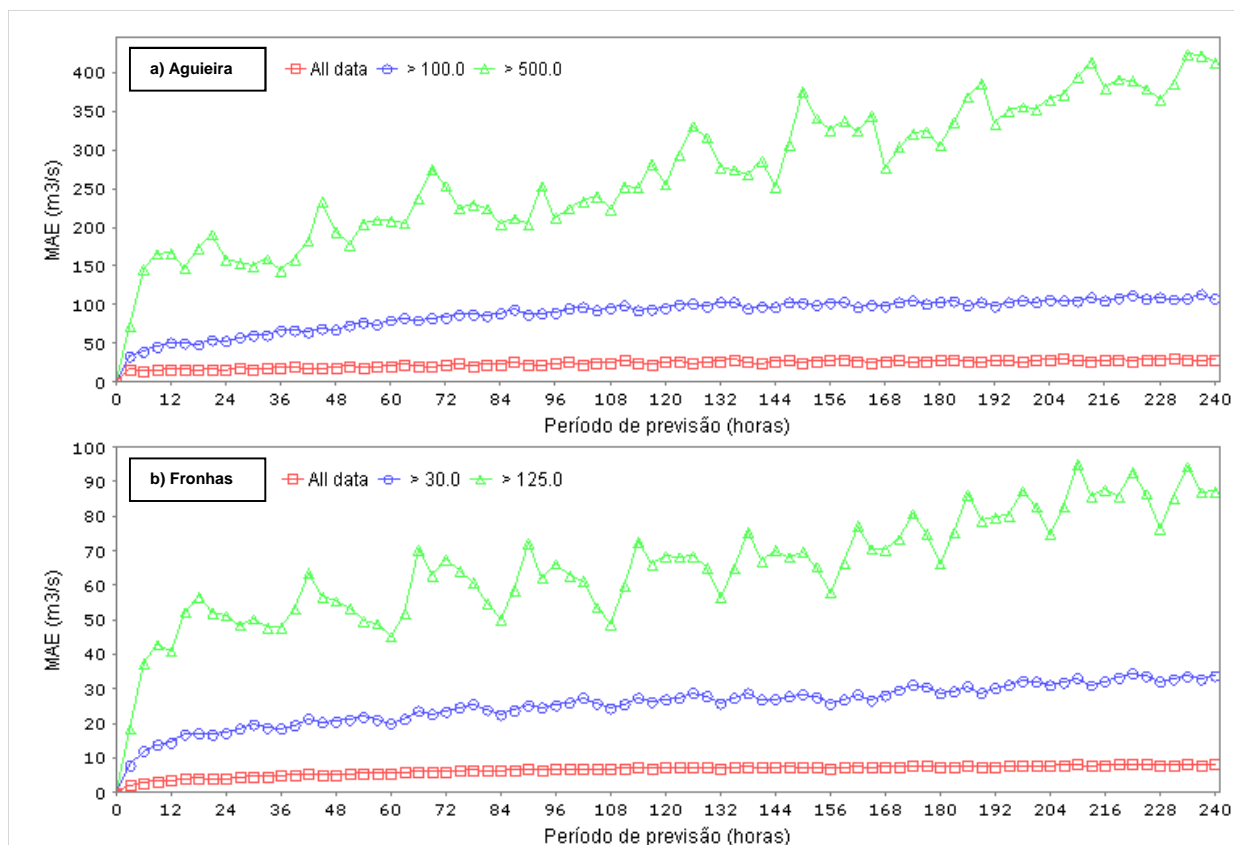


Figura 71. Resultados do MAE da média do conjunto das previsões de caudais por *ensemble*, para cada período de previsão, para: a) a secção da Aguieira – gráfico superior e b) e a secção de Fronhas – gráfico inferior.

Como se pode observar na Figura 71, e como seria de esperar, os erros médios absolutos das previsões aumentam com o período de previsão e com a redução do tamanho da amostra dos dados, para amostras com dados acima dos limiares estabelecidos.

Na análise considerando a totalidade dos dados, os erros variaram entre 15 m³/s até cerca de 30 m³/s na secção da Aguieira, e entre 2 m³/s e 8 m³/s na secção de Fronhas. Por outro lado, considerando as amostras de dados acima dos limiares definidos, os erros atingiram, respetivamente para as secções da Aguieira e de Fronhas: valores próximos de 95 m³/s e 35 m³/s, para o limiar mais reduzido (100 m³/s e 30 m³/s, respetivamente); e próximos de 440 m³/s e 120 m³/s para o limiar mais elevado (500 m³/s e 125 m³/s, respetivamente).

Os resultados para os períodos iniciais de previsão são mais condicionados pelas condições iniciais introduzidas no modelo hidrológico, e portanto apresentam sempre erros mais próximos de zero.

5.5.3.2. Relative Mean Error (Erro Médio Relativo)

Na Figura 72 apresentam-se os resultados obtidos, em cada uma das secções analisadas, para a medida estatística RME – que corresponde ao erro médio relativo.

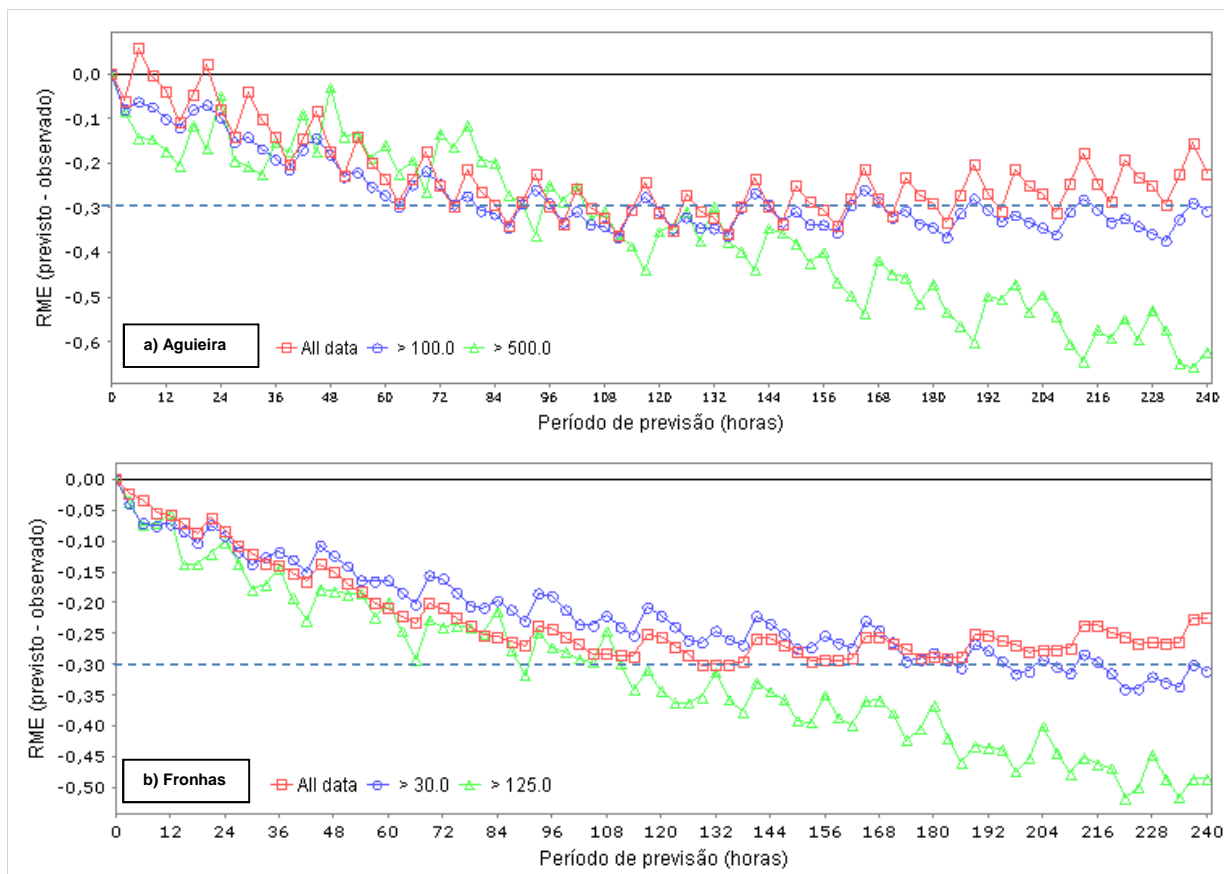


Figura 72. Resultados do RME da média do conjunto das previsões de caudais por *ensemble*, para cada período de previsão, para: a) a secção da Aguieira – gráfico superior e b) e a secção de Fronhas – gráfico inferior.

Tendo em conta os valores absolutos dos resultados do RME apresentados na Figura 72, verifica-se também que o erro das previsões aumenta com o período de previsão, especialmente até cerca das 120 horas. A partir desse período de previsão, o RME estabiliza para a amostra completa de dados e para a amostra com dados superiores ao limiar inferior estabelecido, sendo que duas amostras apresentam valores muito próximos ao longo de todo o período de previsão. Para a amostra com dados superiores ao limiar mais elevado, o erro aumenta de forma contínua ao longo de todo o período de previsão. Sensivelmente até ao período de previsão correspondente às 120 horas, os valores do RME relativos a esta amostra são também próximos dos valores do RME relativos às outras duas amostras de dados.

Resultados negativos do RME indicam que, na média dos dados analisados, os valores médios das previsões por *ensemble* são inferiores aos respetivos valores observados. De acordo com a Figura 72, esses desvios variaram entre zero e cerca de 30% em ambas as secções, para as duas maiores amostras de dados, e atingiram valores próximos de 60% e 70%, respetivamente para as secções da Aguieira e de Fronhas, para a amostra constituída por valores acima do limiar mais elevado.

Daqui se conclui que a média das previsões por *ensemble* subestima os valores observados. No entanto, o desvio existente é, em média, apenas de cerca de 30% para períodos de previsão até 120 horas, quer se inclua toda a amostra, quer se considerem apenas caudais acima dos limiares estabelecidos. Face a todas as incertezas existentes no processo de obtenção das previsões, este desvio foi considerado aceitável.

5.5.3.3. Mean Continuous Rank Probability Score

Os resultados obtidos para a medida estatística MCRPS – que traduz a qualidade de uma previsão por *ensemble* num único valor de erro – em cada uma das secções analisadas, são apresentados na Figura 73. Ao contrário das medidas anteriores calculadas, que consideram apenas a média do *ensemble*, o MCRPS considera toda a distribuição.

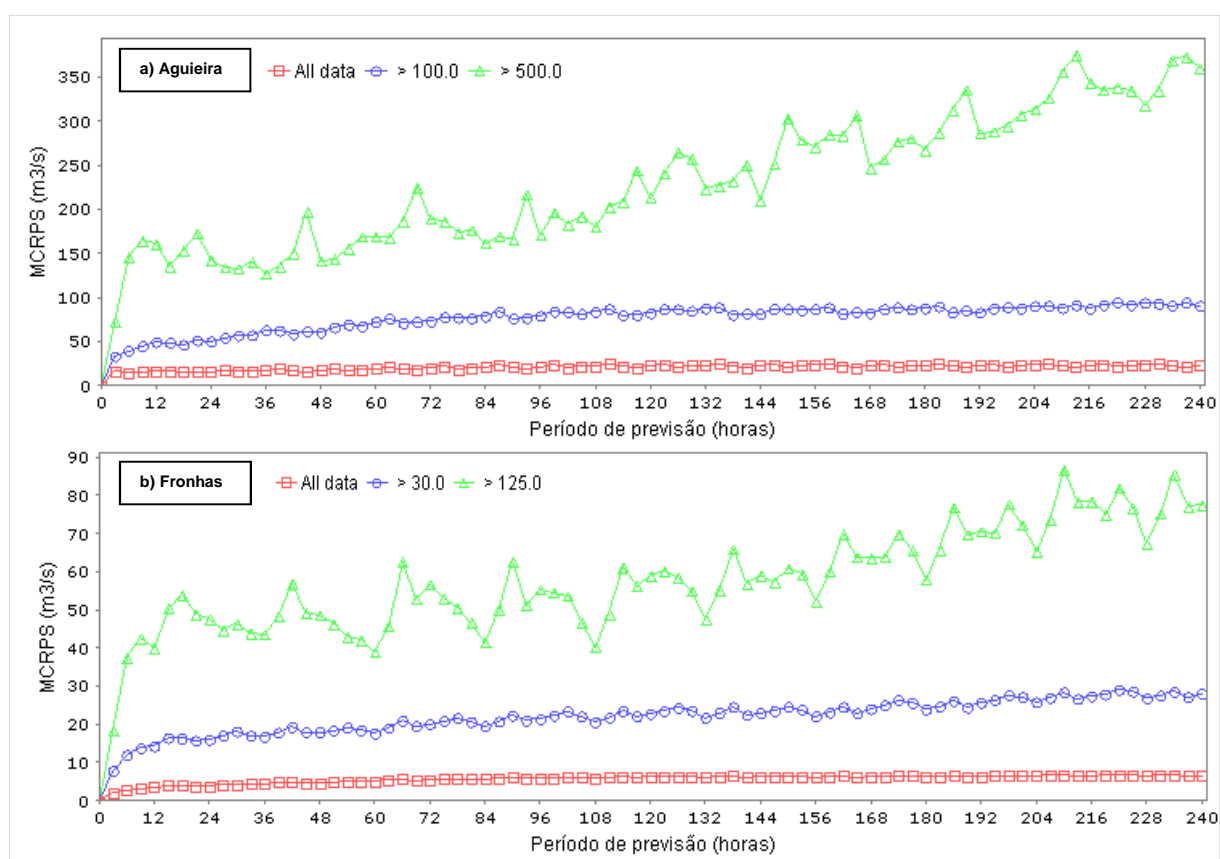


Figura 73. Resultados do MCRPS das previsões de caudais por *ensemble*, para cada período de previsão, para: a) a secção da Aguieira – gráfico superior e b) e para a secção de Fronhas – gráfico inferior.

A análise dos resultados do MCRPS produziu conclusões idênticas às obtidas para a medida MAE. Contudo, os resultados dos erros obtidos com esta medida foram ligeiramente inferiores. Conjugando esses resultados com as conclusões obtidas com o RME, concluiu-se que os valores dos membros acima da média da previsão por *ensemble* estão, em geral, mais próximos dos valores observados.

5.5.3.4. Brier Score

Na Figura 74 apresentam-se os resultados obtidos, em cada uma das secções analisadas, para o índice Brier Score (BS), que permite avaliar o erro com que eventos discretos – como a excedência de um limiar – são previstos através da distribuição das previsões por *ensemble*.

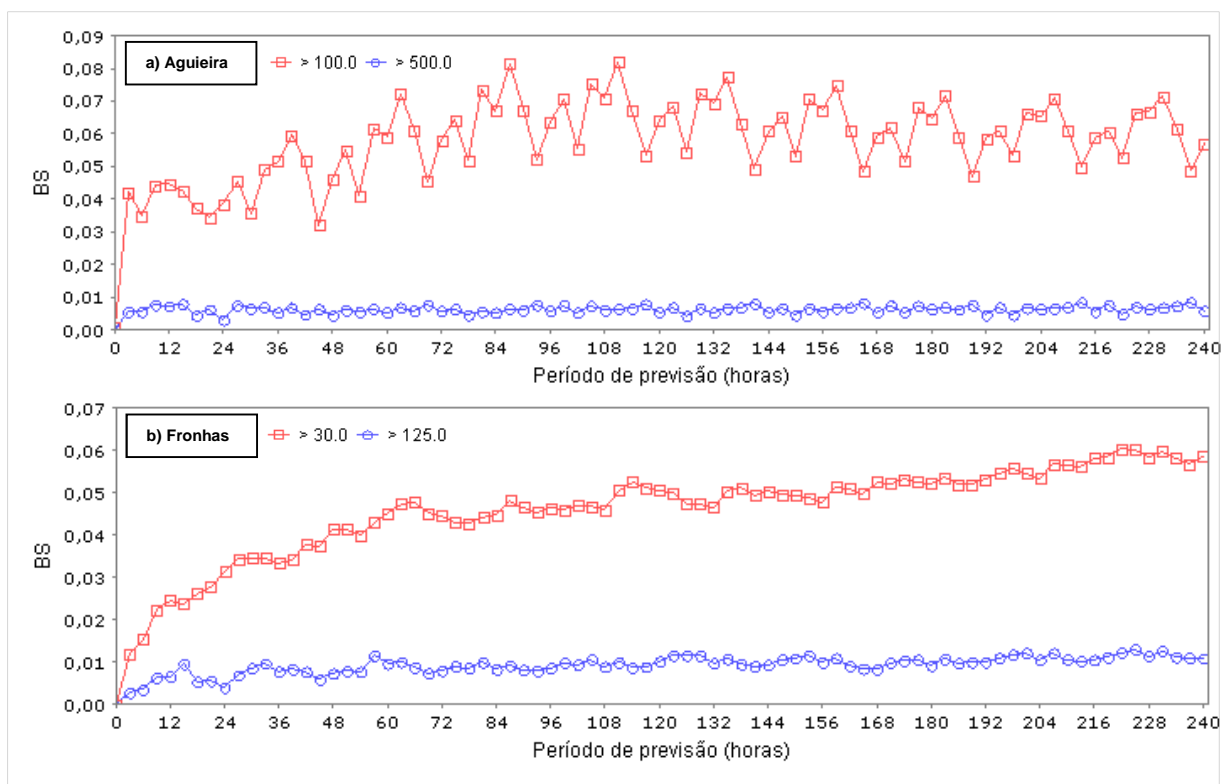


Figura 74. Resultados do BS das previsões de caudais por *ensemble*, para cada limiar definido na legenda e para cada período de previsão, para: a) a secção da Aguieira – gráfico superior e b) e a secção de Fronhas – gráfico inferior.

Atendendo à Figura 74, e tal como observado com as medidas MAE e MCRPS, na análise de BS também se verifica um aumento genérico dos erros de previsão com o aumento do período de previsão. No entanto, a análise deste índice indicia que existem mais erros na previsão da excedência dos limiares inferiores definidos para cada secção, do que na previsão da excedência dos limiares superiores. Tal situação é explicada pelo facto do índice BS estar relacionado com probabilidade de excedência de um determinado limiar (ver descrição deste índice apresentada em A.2.3 do Anexo 2) e essa probabilidade ser tanto maior quanto menor for o valor desse limiar.

Os valores máximos atingidos por esse índice, respetivamente para as secções da Aguieira e de Fronhas, foram de cerca de 0,08 e 0,06 (Figura 74), que são valores muito próximos do resultado ideal (BS=0, ver Quadro 9). Com base nestes resultados, pode inferir-se que as ocorrências efetivas de caudais acima dos limiares definidos têm uma probabilidade muito elevada serem previstas pelas previsões por *ensemble*.

5.5.3.5. Rank Histogram

Na Figura 75 e na Figura 76 apresentam-se, para cada uma das secções analisadas, os resultados do *Rank Histogram* das previsões de caudais por *ensemble* para os períodos de previsão de 24, 72, 120 e 240 horas. Nessas figuras, os pontos e linhas a vermelho correspondem aos histogramas considerando todos os dados do período de análise, e a azul e a verde são representados os histogramas considerando apenas os dados correspondentes a ocorrências de caudais acima dos limiares definidos na legenda.

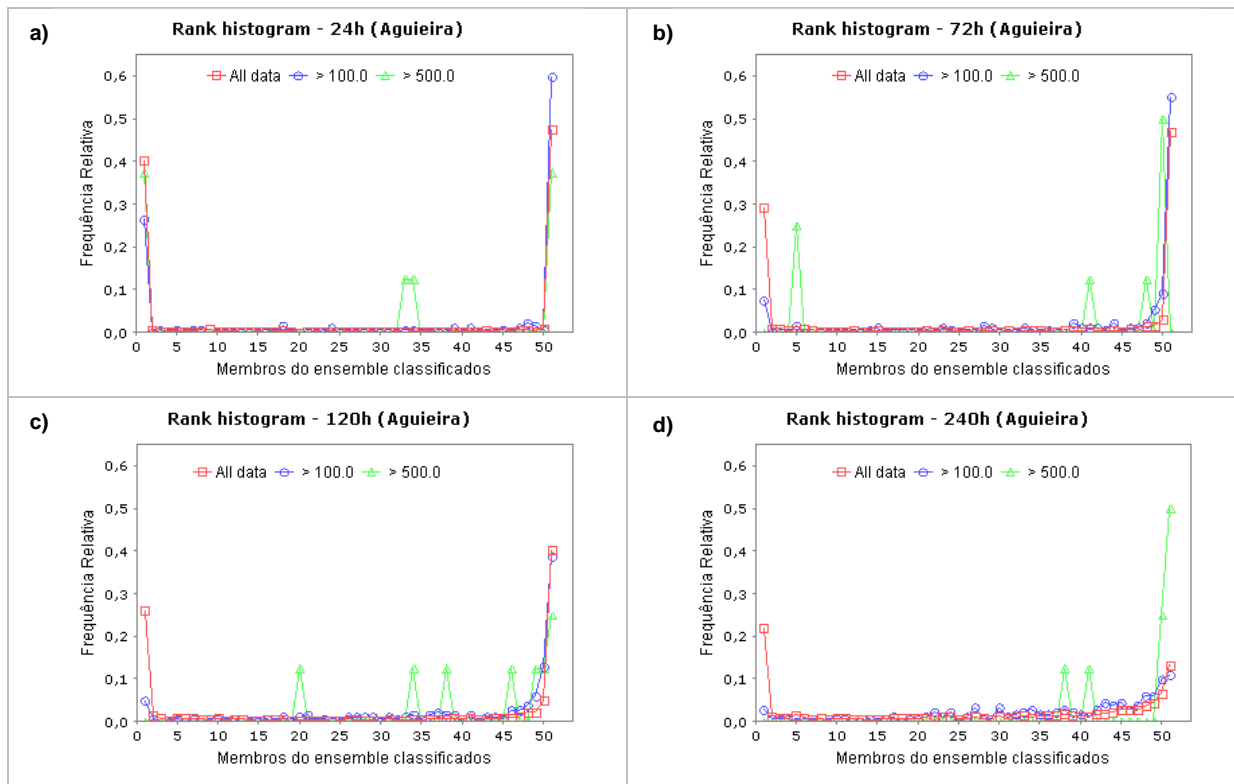


Figura 75. Resultados do *Rank Histogram* das previsões de caudais por *ensemble* na secção da Aguieira, para os períodos de previsão de 24h, 72h, 120h e 240h.

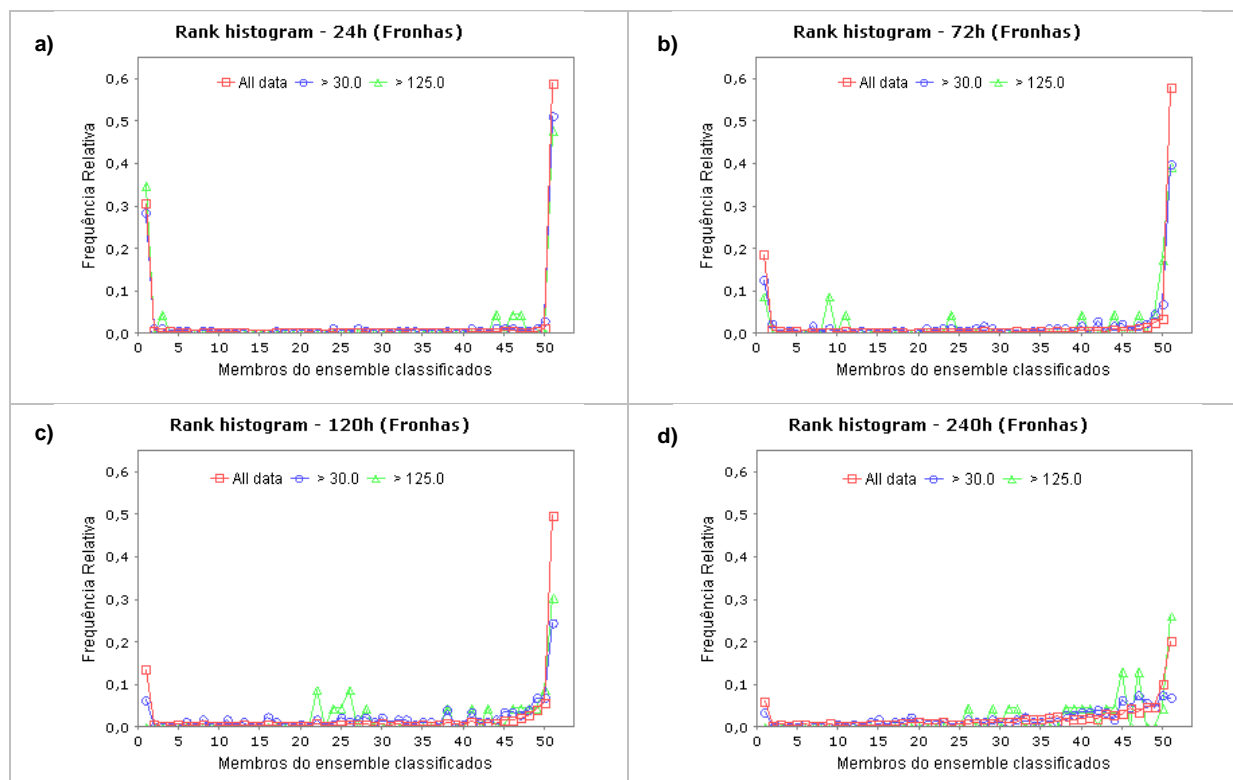


Figura 76. Resultados do *Rank Histogram* das previsões de caudais por *ensemble* na secção de Fronhas, para os períodos de previsão de 24h, 72h, 120h e 240h.

Como se pode observar na Figura 75a e na Figura 76a, para um menor período de previsão – no caso apresentado correspondente a 24 horas – os histogramas exibem de uma forma geral o formato em “U”, que indica que as observações correspondentes ocorreram muitas vezes acima e muitas vezes abaixo dos membros da previsão. No entanto, ainda assim, nesses casos observa-se um ligeiro viés negativo (desvio para a direita), ou seja, a existência de mais casos em que os valores observados ficaram acima do valor máximo do *ensemble*, do que abaixo do valor mínimo. Com o prolongamento do período de previsão, observa-se uma maior tendência para os histogramas tomarem o formato de “L invertido”, que indica que o viés dos dados analisados é claramente negativo, ou seja, que as observações se situaram mais vezes acima do que abaixo da maioria dos membros de previsão – ou, por outras palavras, do percentil 50 (mediana) das previsões por *ensemble*. Essa conclusão vem assim reforçar as conclusões obtidas com as anteriores medidas de erro calculadas com a média das previsões por *ensemble*, nomeadamente com a análise do RME.

Para os maiores períodos de previsão, que no caso apresentado correspondem a 240 horas (Figura 75d e Figura 76d), os histogramas apresentam um maior espalhamento das observações, apesar de ainda assim ser notório um viés negativo das previsões. Este facto está relacionado com a existência de uma maior dispersão das previsões para os períodos de previsão mais extensos, pois quanto mais alargado é o intervalo das previsões, maior é a probabilidade da observação se encontrar dentro desse intervalo (ver exemplos na análise gráfica apresentada em 5.5.1).

5.5.3.6. Relative Operating Characteristic Diagram

Na Figura 77 e na Figura 78 apresentam-se, para cada uma das secções analisadas e para os períodos de previsão de 24, 72, 120 e 240 horas, os diagramas designados ROCD, correspondentes a cada um dos limiares estabelecidos. Na determinação de cada curva dos diagramas apresentados definiram-se 52 pontos (ou percentis), que representam os membros ordenados das previsões por *ensemble*.

Esta é a segunda avaliação estatística da qualidade das previsões por *ensemble* apresentada na presente tese que é focada na ocorrência de eventos discretos, correspondentes à excedência dos limiares definidos (a primeira foi o Brier Score).

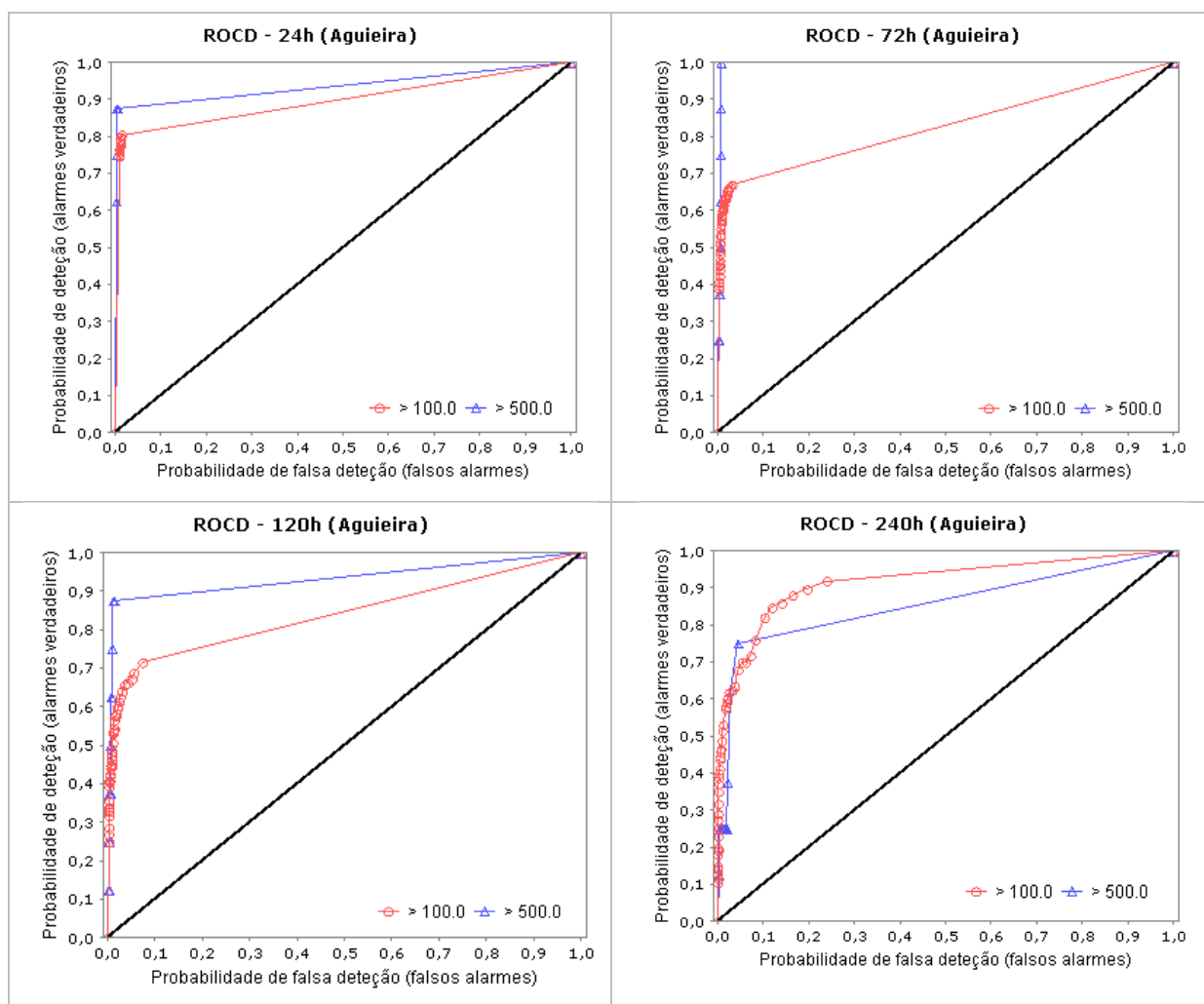


Figura 77. Resultados do ROCD das previsões de caudais por *ensemble* na secção da Aguieira, para cada limiar definido na legenda e para cada um dos períodos de previsão de 24h, 72h, 120h e 240h.

Como se pode observar na Figura 77, a probabilidade de ocorrência de falsos alarmes nas previsões analisadas é em geral muito baixa – todos os pontos dos gráficos se localizam abaixo de 0,3 no eixo das abcissas – o que significa que o número de previsões de eventos acima dos limiares pré-definidos que não foram efetivamente observados é reduzido. No entanto, observa-se que essa probabilidade de

ocorrência aumenta com o aumento do período de previsão e do número de ordem dos membros das previsões por *ensemble*, o que mais uma vez está relacionado com a dispersão das previsões, como explicado anteriormente.

Quanto à probabilidade de deteção dos eventos definidos, observa-se que esta não se altera significativamente em função do período de previsão, mas revela um grande aumento com o incremento do número de ordem dos membros das previsões por *ensemble*.

De acordo com os diagramas apresentados na figura anterior, os membros superiores das previsões por *ensemble* apresentam uma probabilidade de deteção dos eventos definidos (ocorrências acima dos limiares estabelecidos) acima de 70%, e uma probabilidade de detetar eventos falsos abaixo de 30%.

As conclusões extraídas da análise da Figura 77 são também válidas, e poderiam ser obtidas, a partir da Figura 78, que expõe os diagramas ROCD para a secção de Fronhas.

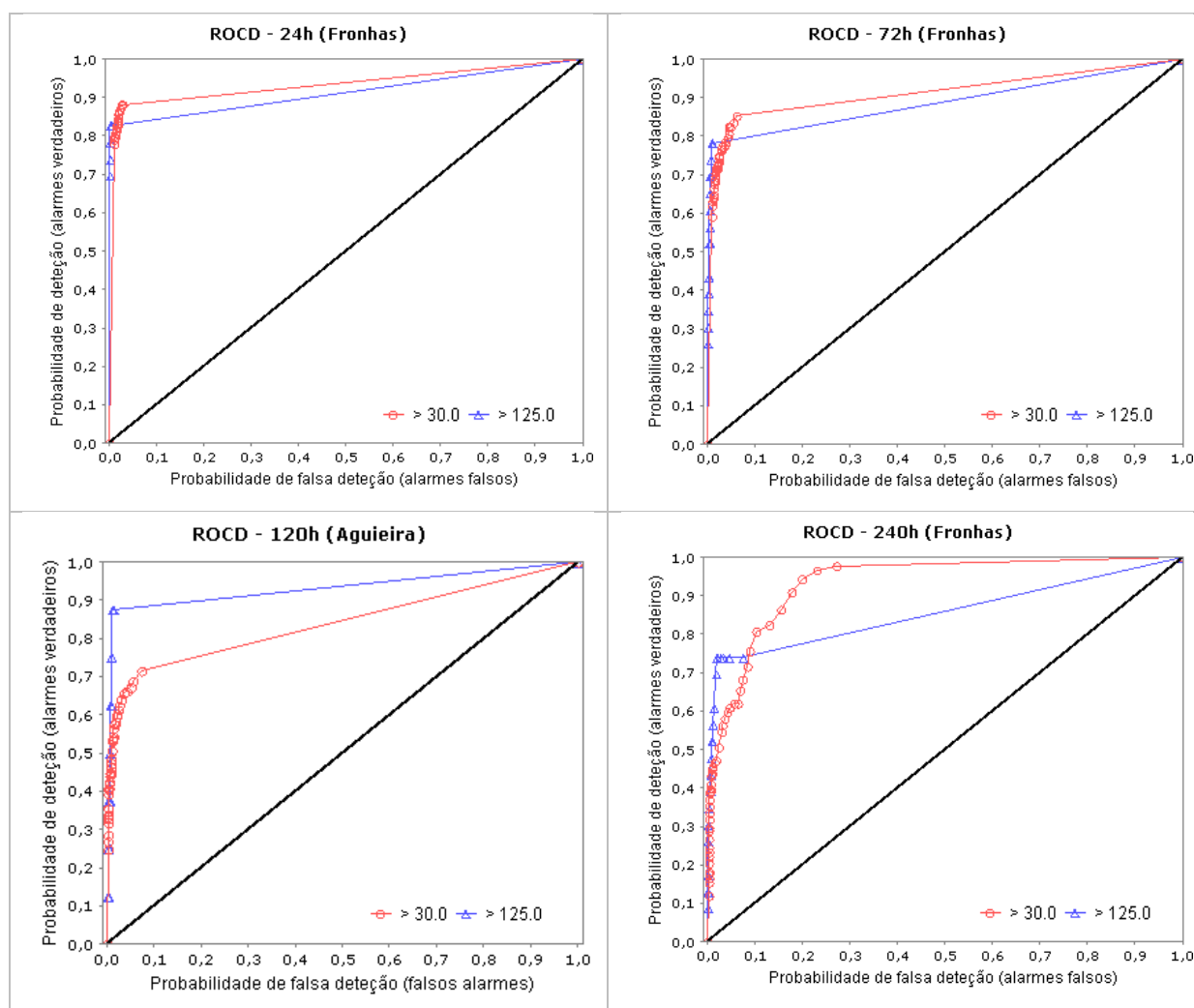


Figura 78. Resultados do ROCD das previsões de caudais por *ensemble* na secção de Fronhas, para cada limiar definido na legenda e para cada um dos períodos de previsão de 24h, 72h, 120h e 240h.

5.5.3.7. Conclusões gerais sobre a qualidade das previsões

Atendendo às conclusões inferidas através da análise dos resultados de cada um dos métodos estatísticos apresentadas nos pontos anteriores (5.5.3.1 a 5.5.3.6), e à ausência de critérios de referência que permitam, de forma sistemática, classificar a qualidade das previsões em função dos resultados desses métodos (ver 2.4.2), conclui-se que as previsões de caudais por *ensemble* produzidas no âmbito desta tese apresentam, em geral, boa qualidade para detetar a ocorrência de caudais acima dos limiares estabelecidos, especialmente quando são considerados percentis mais elevados do *ensemble*.

Quanto à previsão da magnitude dos eventos, concluiu-se que, em geral, a média das previsões por *ensemble* subestima os valores reais dos caudais afluentes às duas secções consideradas (Aguieira e Fronhas), apesar do desvio esperado ser, em média, de apenas cerca de 30% para períodos de previsão até 120 horas. Os percentis superiores exibem também um desvio negativo, sobretudo nos primeiros períodos de previsão, uma vez que se verificaram muitos casos (mais de 40% dos casos, para períodos de previsão até 120 horas) em que as observações ficaram acima do valor máximo do *ensemble*, conforme mostrado nos histogramas frequências apresentada nas Figuras 75 e 76. No entanto, considerando apenas os percentis superiores das previsões localizados acima da média, o desvio será necessariamente inferior a 30%, que por si já é um desvio que pode ser considerado aceitável face a todas as incertezas existentes no processo de obtenção das previsões.

5.5.4. SELEÇÃO DA PREVISÃO DE REFERÊNCIA PARA A TOMADA DE DECISÕES

Como anteriormente referido (ver 3.5), face à incerteza existente nos resultados das previsões por *ensemble*, é necessário selecionar uma previsão de referência para a tomada de decisões operacionais na gestão das albufeiras e a adoção de medidas de controlo e proteção contra cheias.

Essa previsão de referência deve ter em conta, quer a proximidade das várias previsões realizadas para o mesmo período (consistência), quer a aderência aos dados correspondentes observados (qualidade).

Atendendo às conclusões obtidas com a análise da consistência e da qualidade das previsões por *ensemble* anteriormente apresentadas, definiu-se que a previsão de referência deverá ser composta por:

- i) valor máximo do *ensemble* nas primeiras 72 horas, que corresponde à solução mais conservadora e com menor erro associado, em comparação com o uso de um percentil menor;
- ii) percentil 75 do *ensemble* nas horas seguintes (das 72 às 240h), que por um lado é uma orientação mais conservadora e apresenta um erro relativo médio menor em comparação com o uso do valor médio, e por outro lado tem uma probabilidade de deteção de falsos alarmes menor que o uso do valor máximo do *ensemble*. Por essa razão, e uma vez que as previsões acima das 72 horas apresentam maior dispersão, selecionou-se como referência o percentil 75 – que está entre o valor médio e o valor máximo do *ensemble* – de modo a minimizar o acionamento de medidas desnecessárias para o controlo de cheias, originadas por alarmes falsos, e em simultâneo preservar um bom desempenho na deteção de alarmes verdadeiros. Contudo, o impacto que os desvios na previsão de referência além das 72 horas de previsão

terão efetivamente na gestão operacional das albufeiras do sistema aqui estudado não é significativo e poderá ser minimizado na previsão do dia seguinte.

5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo evidenciou-se a aplicação de uma série de procedimentos necessários para gerar previsões de caudais para utilização na gestão operacional de albufeiras em situações de cheia, onde se incluem: i) o processamento de dados de previsão meteorológica e de dados hidrometeorológicos observados, ii) a preparação, calibração, alimentação e execução de múltiplas simulações de um modelo hidrológico, e iii) o processamento e análise de uma grande quantidade de dados de saída.

Com esta aplicação, demonstrou-se que a operacionalização destas previsões é perfeitamente exequível e que se podem esperar resultados próximos da realidade observada, os quais, como se procurará demonstrar no capítulo 6, terão efeitos positivos na capacidade de gestão das albufeiras, nomeadamente no controlo de cheias.

É importante referir que ao longo da aplicação dos vários processos foi necessário efetuar algumas simplificações, que certamente têm impacto nos resultados das previsões, e que em outras aplicações poderão ser evitadas, podendo avaliar-se esse impacto. A maioria das simplificações aqui efetuadas deveu-se essencialmente ao défice de dados, especialmente ao facto de não haver disponibilidade de mais estações na bacia com séries longas, fiáveis e atualizadas de registos hidrometeorológicos. Esta lacuna condicionou os métodos de simulação selecionados, o processo de calibração, verificação e alimentação do modelo hidrológico e, consequentemente, os resultados da previsão hidrológica. Além disso, e em consequência da dificuldade em calibrar e avaliar o funcionamento do modelo hidrológico de forma tão distribuída como ele foi inicialmente estruturado, foi também simplificado o processo de introdução dos dados de previsão de precipitação no modelo, considerando que a distribuição desses dados pela bacia é efetuada em apenas 6 áreas homogéneas de precipitação.

Neste trabalho, selecionaram-se apenas as secções da Aguieira e de Fronhas como pontos de verificação dos resultados das simulações, por serem os pontos da bacia em que se dispõe, para o período de análise, de registos de escoamento em regime natural. No entanto, na eventualidade de ficarem disponíveis registos de caudais observados noutras secções de referência do modelo compatíveis com as previsões realizadas, poder-se-ão utilizar esses dados para verificar os resultados das previsões noutras secções da rede hidrográfica.

6

OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO OPERACIONAL DE ALBUFEIRAS EM SITUAÇÕES DE CHEIA

6.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo desenvolve-se a aplicação, ao caso de estudo do sistema regulado Aguieira-Raiva-Fronhas, da metodologia proposta nesta tese (ver secção 3.6) para a otimização da gestão operacional dessas albufeiras em situações de cheia.

Após a descrição do modelo de gestão desenvolvido com base nas características do caso de estudo, são apresentados os resultados da sua aplicação a alguns períodos de cheia e também os resultados correspondentes obtidos com aplicação das regras de exploração vigentes, sendo efetuada a análise comparativa e a discussão dos mesmos, avaliando-se dessa forma o desempenho do modelo.

Por fim, é realizada uma síntese das principais conclusões decorrentes dos resultados obtidos.

6.2. MODELO DE GESTÃO OPERACIONAL

6.2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Devido às características do sistema Aguieira-Raiva-Fronhas, nomeadamente à capacidade de regularização das albufeiras constituintes, a eficiência do funcionamento do mesmo depende sobretudo da gestão conjunta das albufeiras da Aguieira e de Fronhas.

Em situações de risco – normalmente associadas à possibilidade de ocorrência de cheias ou de escassez de água – os diferentes usos da água associados ao sistema podem tornar-se concorrentes e a sua gestão ser controversa. Por isso, a existência de regras de exploração das albufeiras que tenham em conta o compromisso de cumprimento das diferentes funções do sistema, para diferentes cenários de aflúncias, é essencial para uma gestão eficiente dos volumes armazenados e para uma melhor satisfação das utilizações. Habitualmente, essas regras definem um procedimento de atuação distinto em função da estação do ano e/ou do estado hidrológico da bacia, caracterizado por variáveis hidrometeorológicas (precipitação, caudais, níveis hidrométricos) registadas nos dias anteriores.

Com o objetivo de otimizar a gestão dos volumes armazenados no sistema Aguieira-Raiva-Fronhas – nomeadamente em situações de risco de cheia, em que a função de controlo de cheias a jusante pode

ser um fator limitador das restantes utilizações – foi desenvolvido um modelo de gestão que, com base em previsões de caudais para os 10 dias seguintes, permite determinar o caudal a descarregar nas próximas 24 horas por cada uma das albufeiras do sistema, de modo a:

- i) evitar ou minimizar as cheias fluviais em Coimbra e no vale a jusante;
- ii) manter os níveis das albufeiras da Aguieira e de Fronhas tão elevados quanto possível, sem comprometer as condições de segurança das suas estruturas (barragem e órgãos de descarga).

O modelo considera a gestão conjunta das albufeiras da Aguieira e de Fronhas. A gestão da albufeira da Raiva não foi incluída no modelo porque esta não dispõe de capacidade de armazenamento suficiente que permita amortecer caudais de cheia.

Apesar do modelo desenvolvido ter como objetivo principal a gestão operacional das duas referidas albufeiras em situações de cheia, para que o mesmo possa ser utilizado adequadamente em qualquer situação hidrológica, foi integrada adicionalmente no modelo uma extensão apropriada para aplicação do mesmo nas situações correntes, ou seja, quando não há previsão de situações de cheia.

Implicitamente, o modelo integra um conjunto de regras de exploração definidas para as duas referidas albufeiras, que respeitam os objetivos indicados e as características dos seus órgãos de descarga, nomeadamente as capacidades de vazão existentes e as prioridades de uso estabelecidas nas regras de exploração vigentes (ver 4.4.2).

6.2.2. DADOS DE ENTRADA

O modelo desenvolvido tem por base as previsões de referência dos caudais afluentes, em regime natural, às secções da Aguieira (Q_{afl_AG}) e de Fronhas (Q_{afl_FR}) e dos correspondentes caudais afluentes a Coimbra, gerados nas sub-bacias não regularizadas a jusante daquelas secções (Q_{afl_CO-SNR}). Estas previsões foram definidas de acordo com o definido em 5.5.4 e exemplificado na Figura 79.

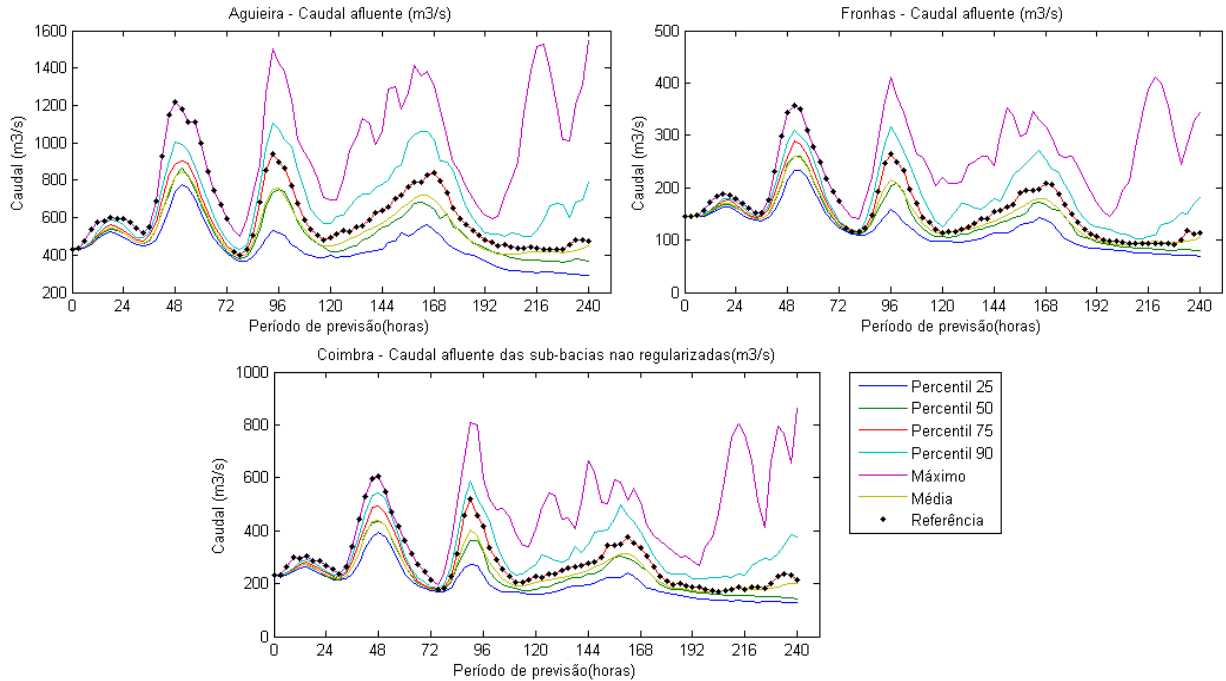


Figura 79. Previsões do caudal afluente em regime natural às secções da Aguieira e de Fronhas e do correspondente caudal afluente à secção de Coimbra decorrente das sub-bacias não regularizadas a jusante daquelas, iniciadas às 00:00h do dia 08-02-2014. As linhas contínuas representam as previsões determinísticas correspondentes aos percentis 25, 50, 75 e 90, à média e ao máximo da previsão por *ensemble* em cada período de previsão; os pontos pretos indicam os valores considerados como previsões de referência (dados de entrada) do modelo de gestão das albufeiras.

De facto, as aflúências a Coimbra aqui referidas (Q_{afl_CO-SNR}) correspondem apenas ao escoamento gerado, em regime natural, na parte não regularizada a montante de Coimbra, ou seja, na área da bacia entre as barragens da Aguieira e Fronhas e o Açude-Ponte de Coimbra ($\approx 1200 \text{ km}^2$), onde se incluem as sub-bacias SB6, SB7, SB17, SB18, SB19 e SB20 do modelo hidrológico (ver Figura 50, apresentada anteriormente em 5.2.1.1).

O modelo de gestão desenvolvido entra em conta também com os caudais efluentes e os níveis de água nas duas albufeiras no instante inicial da simulação, bem como com o transvase de Fronhas para a Aguieira, calculando o volume transferido (V_{trans}), em hm^3 , através das seguintes premissas e equações, estabelecidas com base nas características do túnel de transvase e na análise dos registos da exploração da albufeira de Fronhas (cotas em metros):

- Quando o nível de água da albufeira da Aguieira (N_{AG}) é igual ou superior ao nível de Fronhas (N_{FR}), o volume transferido é nulo.

$$\text{Se } N_{AG} \geq N_{FR} \rightarrow V_{trans} = 0 \quad (\text{Eq. 6})$$

- Se o nível de água na albufeira de Fronhas é superior ao nível da Aguieira ($N_{FR} > N_{AG}$), o volume transferido é calculado através das seguintes equações:

$$- \text{Se } N_{FR} \leq 117 \rightarrow V_{trans} = 0 \quad (\text{Eq. 7})$$

(situação em que o nível de água na albufeira de Fronhas é igual ou inferior à cota da soleira de entrada do túnel de transvase (117 m))

– Se $117 < N_{FR} < 120,50$

$$\rightarrow V_{trans} = (-0.64758 * N_{FR}^2 + 155,7090 * N_{FR} - 9342,405) * \frac{3 * 36}{10\,000} \quad (Eq. 8)$$

(situação em que o nível de água na albufeira de Fronhas se encontra entre as cotas da soleira e da geratriz superior da entrada do túnel de transvase (117 m e 120,50 m, respetivamente); o escoamento no túnel processa-se em superfície livre)

– Se $120,50 \leq N_{FR} < 134$

$$\rightarrow V_{trans} = (-0.05084 * N_{FR}^2 + 13,7851 * N_{FR} - 904,657) * \frac{3 * 36}{10\,000} \quad (Eq. 9)$$

(situação em que o nível de água na albufeira de Fronhas se encontra acima da cota da geratriz superior da entrada do túnel de transvase (120,50 m), até à cota em que é atingida a capacidade máxima de vazão do túnel de transvase (134 m); o escoamento à entrada do túnel processa-se sob pressão)

$$\text{– Se } N_{FR} \geq 134 \rightarrow V_{trans} = 30 * \frac{3 * 36}{10\,000} \quad (Eq. 10)$$

(situação em que se atinge a capacidade máxima de vazão do túnel de transvase: 30 m³/s)

6.2.3. FLUXOGRAMA

Com o objetivo de otimizar os volumes armazenados nas albufeiras da Aguieira e Fronhas tendo em conta as várias condicionantes existentes, foi desenvolvido um modelo de gestão conjunta dessas albufeiras, cujo fluxograma é apresentado na Figura 80. Para a sua utilização na gestão operacional do sistema, o modelo deverá ser aplicado diariamente, considerando como período temporal de análise os 10 dias seguintes; deste período, entretanto, serão apenas considerados os resultados obtidos para as primeiras 24 horas.

Conforme se pode observar na Figura 80, o modelo de gestão é composto por dois módulos de otimização – MO1 e MO2 – ambos baseados num modelo de programação linear, que tem como objetivo minimizar o volume descarregado pelo conjunto das duas referidas albufeiras, maximizando, dessa forma, os volumes nelas armazenados. A principal diferença entre os dois módulos consiste na inclusão ou não de um processo de amortecimento de cheias na formulação do modelo de otimização de base, cuja descrição se apresenta com mais detalhe na secção 6.2.4.

Os dois módulos de otimização são executados sequencialmente. O módulo de otimização MO1, que é executado em primeiro lugar, não tem em conta o amortecimento dos picos de cheia, mas inclui a extensão apropriada para aplicação do modelo nas situações correntes, referida em 6.2.1. O módulo MO2, que inclui o processo de amortecimento de cheias, é executado posteriormente, no caso do caudal máximo afluente a Coimbra (Q_{CO_max}), calculado pelo módulo anterior, ter superado um determinado limite definido ($Limite_i$), a menos de uma pequena tolerância (1 m³/s). São estabelecidos

limites crescentes para o caudal máximo afluente a Coimbra, até serem cumpridas as condições pré-definidas.

O limite inicialmente estabelecido para o Q_{CO_max} é igual a $800 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde ao limiar de caudal a partir do qual as áreas marginais da cidade de Coimbra são inundadas pelo rio Mondego (Silva, 2015). Foi considerado um passo incremental de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ para esse limite, tendo em conta a velocidade de cálculo do modelo e a pequena diferença nos resultados obtidos com esse incremento e com um incremento inferior. Estabeleceu-se também um valor máximo de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ para esse limite, de modo a ter uma margem de segurança suficiente para evitar que o caudal afluente a Coimbra decorrente da aplicação do modelo possa atingir o valor de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ – valor preconizado para o caudal da cheia centenária amortecida em Coimbra (ver 4.3.7.1) – visto que, em determinados casos, decorrentes da combinação dos caudais reais afluentes, dos níveis das albufeiras no início da simulação, das previsões das aflúências para os 10 dias seguintes e das restrições definidas nos módulos de otimização, o modelo de gestão não consegue cumprir o limite máximo estabelecido no período de simulação. Tendo em conta esses casos, consideraram-se duas soluções de gestão, com base no caudal máximo afluente a Coimbra determinado pelo modelo para as 24 horas seguintes: a “Solução A”, quando esse valor é igual ou inferior ao limiar máximo de inundação preconizado ($1200 \text{ m}^3/\text{s}$); e a “Solução B”, nos casos em que esse valor é superior. A descrição do procedimento de exploração a adotar para cada solução de gestão é apresentada em 6.2.5.

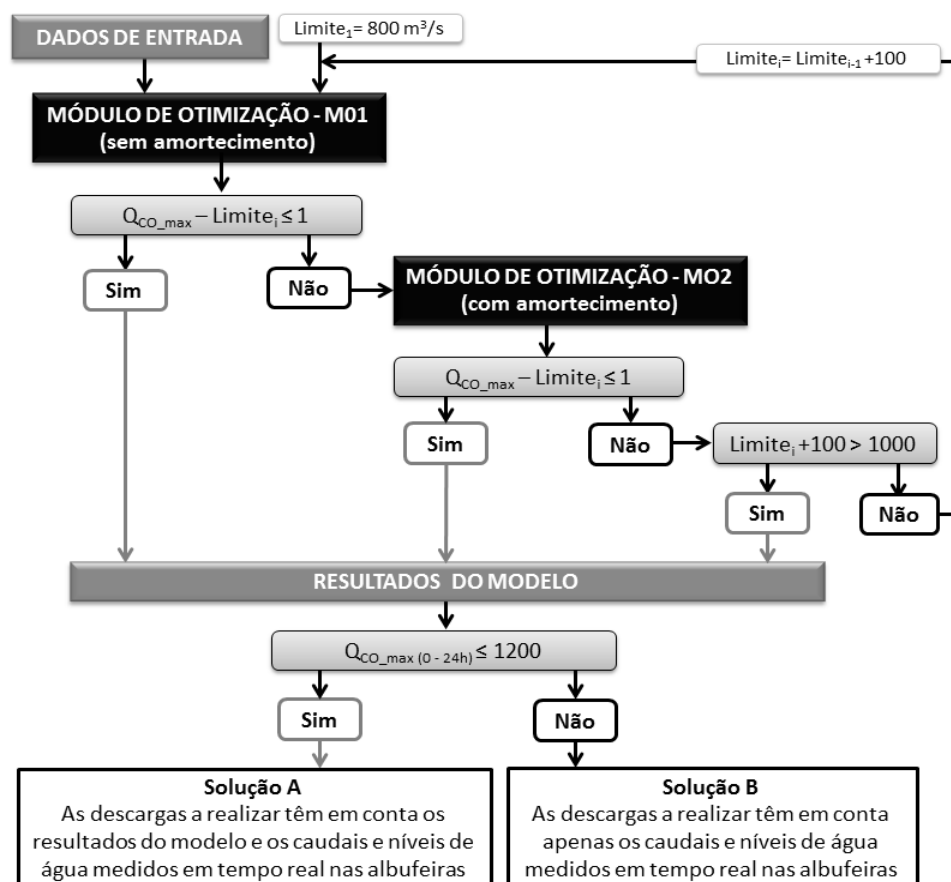


Figura 80. Fluxograma do modelo desenvolvido para a gestão operacional conjunta das albufeiras da Agueira e de Fronhas.

6.2.4. FORMULAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Conforme referido na secção anterior, o modelo de gestão operacional das albufeiras da Aguieira e de Fronhas é composto por dois módulos de otimização baseados num modelo de programação linear (modelo de otimização), que tem como objetivo minimizar o volume descarregado pelo conjunto das duas albufeiras.

A formulação de base do modelo de otimização obedeceu às indicações gerais descritas em 3.6.1. Nesse contexto, a função-objetivo, as variáveis, os dados de entrada e a maioria das restrições enunciadas são comuns aos dois módulos, com a exceção da última restrição descrita (ver restrição c.2 descrita na secção 3.6.1), que apenas faz parte do módulo MO2, que inclui o processo de amortecimento de cheias.

Por conseguinte, para o caso apresentado – respeitante à gestão das albufeiras da Aguieira e de Fronhas – a função-objetivo que minimiza o volume descarregado pelo conjunto das duas albufeiras assume a seguinte forma:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^5 (c_i V_i) \quad (\text{Eq. 11})$$

Em que, c_i são coeficientes da função objetivo e V_i as variáveis do modelo de otimização, que correspondem aos volumes descarregados ($\text{hm}^3/3\text{h}$) pelos diferentes órgãos de descarga das duas albufeiras, sendo:

- V_1 : volume descarregado pelo circuito hidráulico da Aguieira (por turbinamentos);
- V_2 : volume descarregado pelo descarregador de cheias 1 da Aguieira;
- V_3 : volume descarregado pelo descarregador de cheias 2 da Aguieira;
- V_4 : volume descarregado pelos descarregadores de fundo de Fronhas;
- V_5 : volume descarregado pelos descarregadores de meio-fundo de Fronhas;

Os coeficientes c_i da função-objetivo definem as prioridades de utilização dos diferentes órgãos, correspondendo a atribuição de valores menores a uma maior prioridade na descarga pelo órgão correspondente e valores elevados a uma menor prioridade. Dessa forma, definiram-se os seguintes coeficientes:

- $c_1 = 1$ (prioridade nº1 da Aguieira: descarregar pelo circuito hidráulico);
- $c_2 = 10^4$ (prioridade nº2 da Aguieira: abrir o descarregador de cheias 1, após ser esgotada a capacidade de vazão do circuito hidráulico);
- $c_3 = 10^8$ (prioridade nº3 da Aguieira: abrir o descarregador de cheias 2 após ser esgotada a capacidade de vazão do circuito hidráulico e do descarregador de cheias 1);
- $c_4 = 10$ (prioridade nº1 de Fronhas: abrir os descarregadores de fundo);
- $c_5 = 10^8$ (prioridade nº2 de Fronhas: abrir os descarregadores de meio-fundo, após ser esgotada a capacidade de vazão dos descarregadores de fundo).

O valor de c_4 é ligeiramente maior que c_1 porque se pretende que as descargas se iniciem sempre por turbinamentos da Aguieira. Uma vez que o modelo de otimização entra em conta também com o transvase de Fronhas para a Aguieira, que só acontece quando o nível de água na albufeira da Aguieira é inferior ao de Fronhas, ao dar prioridade inicial à descarga pela Aguieira promove-se a redução do nível nesta albufeira e, consequentemente, possibilita-se ou aumenta-se a vazão do transvase.

Os dados de entrada do modelo de otimização são os volumes afluentes previstos às secções de Fronhas, da Aguieira e de Coimbra (parte não regularizada), descritos em 4.6.2., e ainda o volume transferido de Fronhas para a Aguieira, quantificado em cada instante através das equações definidas anteriormente (ver 6.2.2).

Conforme já antes referido, as restrições definidas têm em conta as diretrizes gerais descritas em 3.6.1, sendo seguidamente enunciadas as funções e os procedimentos específicos definidos para o caso de estudo:

a) Restrições de domínio de cada uma das variáveis:

$$V_i \geq 0 \quad (Eq. 12)$$

$$V_i \leq Q_{i \max} * \frac{3*36}{10\,000} \quad (Eq. 13)$$

Em que $Q_{i \max}$ é o valor do caudal máximo de descarga de cada um dos órgãos (m³/s):

$$Q_{1 \max} = 500; Q_{2 \max} = Q_{3 \max} = 1000; \text{ e } Q_{4 \max} = Q_{5 \max} = 250$$

b) Limitação dos níveis de água nas duas albufeiras através da relação com os volumes armazenados (V_{arm}):

- Os níveis máximos de água (m) em cada uma das albufeiras (NMC) são (ver 4.4):

$$NMC_{AG} = 126 \text{ e } NMC_{FR} = 140$$

Para garantir que esses valores não são atingidos, considerou-se nos modelos de otimização uma margem de segurança para cada albufeira, estabelecendo como níveis máximos recomendáveis (NMR) (m):

$$NMR_{AG} = 125,50 \text{ e } NMR_{FR} = 139$$

- Os níveis mínimos de água (m) em cada uma das albufeiras (NmE) são (ver 4.4):

$$NmE_{AG} = 111 \text{ e } NmE_{FR} = 117$$

- De modo a usar um modelo de programação linear, as curvas de capacidades das albufeiras (Figura 27 e Figura 31) foram aproximadas pelas seguintes equações lineares, que são válidas entre os valores mínimos e máximos dos níveis de água de cada uma das albufeiras acima indicados, com coeficientes de correlação superiores a 0,95 (baseado numa amostra de pontos lidos, para cada 2 m de nível, no intervalo entre o NMC e o NmE, nos gráficos correspondentes):

$$N_{AG} = 0,05789 * V_{\text{arm},AG} + 100,30 \quad (Eq. 14)$$

$$N_{FR} = 0,29690 * V_{\text{arm},FR} + 119,15 \quad (Eq. 15)$$

- O volume armazenado (V_{arm}) num determinado instante t corresponde ao somatório do volume armazenado no instante anterior ($t-1$) com o diferencial entre os volumes totais afluentes (V_{afl}) e efluentes ou descarregados ($\sum V_i$) nesse intervalo de tempo:

$$V_{arm}(t) = V_{arm,(t-1)} + V_{afl}(t) - \sum V_i(t) \quad (Eq. 16)$$

- Substituindo a Eq.16 em cada uma das equações Eq.14 e Eq.15, e impondo que o nível de água em cada uma das albufeiras não poderá exceder o NMR correspondente, obtêm-se as seguintes restrições em função do volume total descarregado pelos diferentes órgãos de descarga de cada uma das duas albufeiras analisadas:

$$\sum_{i=1}^3 V_i(t) \leq \frac{100,30 - NMR_{AG}}{0,05789} - V_{arm,AG}(t-1) + V_{afl_AG}(t) \quad (Eq. 17)$$

$$\sum_{i=4}^5 V_i(t) \leq \frac{119,15 - NMR_{FR}}{0,05789} - V_{arm,FR}(t-1) + V_{afl_FR}(t) \quad (Eq. 18)$$

c) Limitação do caudal máximo afluente a Coimbra:

c.1) Tendo em conta as afluências instantâneas a instante

- Em cada instante, a soma do volume total descarregado pelas duas albufeiras consideradas ($\sum V_i$) com o volume total de escoamento gerado na parte não regularizada a montante de Coimbra (V_{afl_CO-SNR}) não deve exceder o volume correspondente ao valor máximo do caudal estabelecido para essa secção (Q_{CO_max}):

$$\sum_{i=1}^5 V_i(t) \leq Q_{CO_max} * \frac{3 * 36}{10\,000} - V_{afl_CO-SNR}(t) \quad (Eq. 19)$$

c.2) Tendo em conta as afluências globais previstas para o alcance total de previsão (10 dias)
(condição aplicável apenas ao módulo de otimização MO2, com amortecimento de cheias):

- Para aplicação da restrição do modelo que impõe o amortecimento de um determinado caudal de pico de cheia, foi desenvolvido um algoritmo numérico que precede a aplicação do modelo de otimização no módulo MO2 e que calcula: i) o caudal máximo que, em cada instante, pode ser descarregado pelo conjunto das duas albufeiras consideradas ($\sum V_i$) de modo a que não seja ultrapassado, no período de previsão de 10 dias, o valor definido para o caudal afluente máximo a Coimbra (Q_{CO_max}) e ii) o volume que deverá ser armazenado pelas albufeiras para que essa condição se verifique. Para tal, e dada a existência de afluências a Coimbra provenientes de sub-bacias não regularizadas, definiu-se uma primeira variável auxiliar ($V_{aux,1}$) que representa o volume total máximo que, em cada instante, pode ser descarregado pelo conjunto das duas albufeiras, sem que o volume afluente a Coimbra ultrapasse o valor definido. Depois, definiu-se uma segunda variável auxiliar ($V_{aux,2}$) que representa o volume total máximo que, em cada instante, deve ficar armazenado nas mesmas albufeiras, para garantir a mesma condição. Ambas as variáveis auxiliares podem tomar valores positivos ou negativos.

$$V_{aux,1}(t) = Q_{CO_max} * \frac{3 * 36}{10\,000} - V_{afl_CO-SNR}(t) \quad (Eq. 20)$$

$$V_{aux,2}(t) = V_{afl_AG}(t) + V_{afl_FR}(t) - V_{aux,1}(t) \quad (Eq. 21)$$

Para evitar que o volume de encaixe a garantir pelas duas albufeiras seja condicionado, desde o início do período temporal de análise, pelas previsões dos caudais para o total desse período (10 dias seguintes), gerando sempre o volume de encaixe no início desse período – podendo levar à sugestão de operações de descarga desnecessárias, caso as previsões de referência dos caudais para os próximos 10 dias não se verifiquem de acordo com o estimado – o algoritmo numérico processa o amortecimento de caudais de cheia do final para o início do período de previsão, conforme representado graficamente na Figura 81. Para simplificar a ilustração do processo de amortecimento, no esquema apresentado na Figura 81 não se considerou a existência de bacias não regularizadas, ou seja, a área limitada entre o eixo das abcissas e a linha Q_{CO_max} representa a variável $V_{aux,1}(t)$. Nessa mesma figura, as áreas assinaladas a cores diferentes representam os volumes a encaixar pelo conjunto das duas albufeiras, e a área compreendida entre o eixo das abcissas e a linha vermelha a tracejado corresponde ao volume que, em cada instante, tem de ser descarregado pelo conjunto das duas albufeiras ($V_{D(t)}$) para que o caudal máximo afluente a Coimbra, em regime regularizado, não exceda, no período de previsão, o valor máximo definido. O algoritmo numérico desenvolvido para determinar os valores de $V_{D(t)}$ consiste na execução das seguintes tarefas:

- i) acumula os valores da variável $V_{aux,2}$, do fim para o início do período de previsão, desde os instantes em que a variável $V_{aux,2}$ assume valores positivos até ao valor acumulado ser nulo (processo de amortecimento de volumes de cheia);
- ii) regista, numa variável auxiliar $v_{aux,3}$, da mesma dimensão $V_{aux,2}$, os instantes de tempo em que o processo de amortecimento descrito em i) foi aplicado, utilizando o seguinte código: $v_{aux,3}(t) = 1$, se o processo foi aplicado, e $v_{aux,3}(t) = 0$, caso contrário;
- iii) calcula os valores de $V_{D(t)}$ considerando, para cada instante, as seguintes premissas:

$$- \text{Se } v_{aux,3}(t) = 0 \rightarrow V_{D(t)} = V_{afl_AG}(t) + V_{afl_FR}(t) \quad (Eq. 22)$$

$$- \text{Se } v_{aux,3}(t) = 1 \rightarrow V_{D(t)} = V_{aux,1}(t) \quad (Eq. 23)$$

- Depois de aplicado o algoritmo numérico descrito, para o cálculo do volume que é necessário descarregar antecipadamente por cada uma das albufeiras – de modo a criar capacidade de encaixe que evite que o caudal total descarregado em cada instante pelo conjunto das albufeiras ultrapasse o valor do caudal afluente máximo a Coimbra – o modelo de otimização (apenas no módulo MO2) inclui, adicionalmente às restrições anteriormente definidas (identificadas como a, b e c1), a seguinte restrição (Eq. 24):

$$\sum_{i=1}^5 V_i(t) \geq V_{D(t)} \quad (Eq. 24)$$

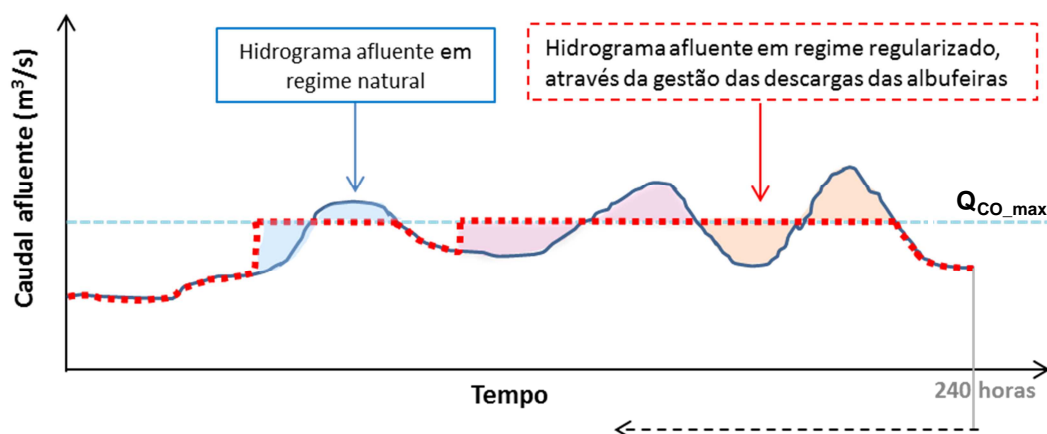


Figura 81. Esquema ilustrativo do processo de limitação do caudal máximo afluente a Coimbra (Q_{CO_max}), tendo em conta apenas as afluências previstas para as futuras 240 horas das sub-bacias regularizadas (réplica da Figura 20).

Conforme referido em 6.2.3, o módulo de otimização MO1 (o primeiro a ser aplicado) inclui adicionalmente uma extensão apropriada para aplicação do modelo de gestão em situações correntes, ou seja, quando não há previsão de situações de cheia. Essa extensão consiste num algoritmo numérico que tem como função repor os níveis de água de base definidos na presente tese para cada uma das albufeiras, que correspondem aos NME (m) aqui propostos: $NME_{AG} = 122$ e $NME_{FR} = 126$. Esse algoritmo é executado, para cada instante do período de previsão, após o modelo de otimização e, em função do nível de água em cada uma das albufeiras obtido pelo modelo nesse instante, o algoritmo considera a abertura ou o fecho dos órgãos de descarga correspondentes para que, no instante seguinte, os níveis de água nas duas albufeiras tendam para os níveis de base definidos. Sem esta extensão integrada no módulo MO1, o modelo de otimização correspondente minimizaria os volumes descarregados pelos vários órgãos ao longo de todo o período de previsão, levando à previsão de um aumento progressivo do nível de água nas albufeiras, até se atingirem os NMR correspondentes, o que em situações correntes não se aplica.

O algoritmo desenvolvido em linguagem Matlab que executa os dois módulos do modelo de otimização da gestão operacional das albufeiras da Aguieira e de Fronhas é apresentado no Anexo 4.1.

6.2.5. PROCEDIMENTOS DE EXPLORAÇÃO A ADOTAR EM FUNÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO

No seguimento do descrito em 6.2.3, apresentam-se aqui os procedimentos de exploração definidos para cada solução de gestão operacional estabelecida pelo modelo descrito no presente capítulo.

De acordo com o indicado na Figura 80, a “Solução A” consiste em adotar os resultados do modelo na gestão das albufeiras de Aguieira e de Fronhas para o dia seguinte à simulação, sendo que, para garantia de segurança das estruturas hidráulicas, tem em conta também os caudais afluentes e os níveis de água medidos em tempo real nas duas albufeiras. Para tal, deverá ser adotado, em cada instante (real), o seguinte procedimento de exploração para cada uma das albufeiras:

- Se o nível de água for superior ao nível máximo recomendável estabelecido (NMR), ou seja, $N_{AG} > 125,50$ ou $N_{AG} > 139$:

- a1) Se o caudal real afluyente a cada uma das albufeiras for superior ao caudal a descarregar determinado pelo modelo, deve descarregar-se o caudal afluyente, mantendo momentaneamente o nível de água existente na albufeira;
- a2) No caso contrário, deve descarregar-se o caudal determinado pelo modelo, reduzindo o nível de água na albufeira.
- b) Se o nível de água for inferior ao nível mínimo de exploração (NmE) ou seja, $N_{AG} < 111$ ou $N_{FR} < 117$, não deverá realizar-se nenhuma descarga de caudal para não diminuir ainda mais o nível de água na(s) albufeira(s) onde essa situação se verifique.
- c) Nos restantes casos, as descargas devem ser efetuadas de acordo com os resultados do modelo.

Por outro lado, a “Solução B” consiste em não considerar em termos operacionais os resultados do modelo nas 24 horas seguintes. De facto, e uma vez que, neste caso, as restrições dos modelos de otimização não são cumpridas nas 24 horas seguintes à data da simulação e o caudal máximo afluyente a Coimbra estimado para esse período supera os $1200\text{m}^3/\text{s}$, considera-se esses resultados não válidos para utilização na gestão das albufeiras no dia seguinte. Dessa forma, para garantir a segurança das estruturas hidráulicas, a “Solução B” tem em conta apenas os caudais afluentes e os níveis de água medidos em tempo real nas albufeiras, adotando, em cada instante real, o seguinte procedimento de exploração para cada uma das albufeiras:

- a) Se o nível de água for superior ao NMR correspondente:

a1) Na albufeira da Aguieira:

- a1.1) Se o caudal real afluyente à albufeira da Aguieira for superior a $500\text{ m}^3/\text{s}$ – que é a capacidade de vazão máxima teórica do circuito hidráulico das turbinas (ver 4.4.1.1) – deve descarregar-se o caudal afluyente, mantendo momentaneamente o nível de água existente na albufeira;
- a1.2) No caso contrário, deve descarregar-se um caudal de $500\text{ m}^3/\text{s}$, reduzindo o nível de água na albufeira.

a2) Na albufeira de Fronhas:

- a2.1) Se o caudal real afluyente à albufeira de Fronhas for superior a $500\text{ m}^3/\text{s}$ – que é a capacidade de vazão máxima teórica dos seus quatro descarregadores (dois de fundo e 2 de meio-fundo, ver 4.4.1.3) – devem abrir-se totalmente os quatro descarregadores de cheia para descarregar o caudal máximo possível, em função do nível na albufeira;
- a2.2) No caso contrário:
 - a2.2.1) Se o caudal real afluyente for superior a $250\text{ m}^3/\text{s}$ – que é a capacidade de vazão máxima teórica dos seus descarregadores de fundo, que são os primeiros órgãos a ser acionados em caso de cheia (ver 4.4.1.3) – deve descarregar-se o caudal afluyente, mantendo momentaneamente o nível de água na albufeira;
 - a2.2.2) Se o caudal real afluyente for igual ou inferior a $250\text{ m}^3/\text{s}$ devem abrir-se totalmente as duas descargas de fundo, para reduzir o nível de água na albufeira.

- b) Se, o nível de água for inferior ao NmE correspondente, não deverá realizar-se nenhuma descarga de caudal para não diminuir ainda mais o nível de água na(s) albufeira(s) onde essa situação se verifique.
- c) Se o nível de água se encontrar entre o NmE e o NMR:
 - c1) Na albufeira da Aguieira:
 - c1.1) Deve descarregar-se um caudal de 500 m³/s;
 - c2) Na albufeira de Fronhas:
 - c2.1) Se o nível de água na albufeira for inferior ou igual a 130,50 m, não deverá realizar-se nenhuma descarga (descarregadores totalmente fechados);
 - c2.2) Se a o nível de água na albufeira for superior a 130,5 m e inferior ou igual a 136,5 m – que são os níveis de referência de abertura dos descarregadores da barragem de Fronhas definidos nas regras de exploração vigentes (ver 4.4.2) – deve abrir-se totalmente os dois descarregadores de fundo;
 - c2.3) Se o nível de água na albufeira for superior a 136,5 m:
 - c2.3.1) Se o caudal afluente for superior a 500 m³/s, devem abrir-se totalmente os quatro descarregadores de cheia;
 - c2.3.2) Se o caudal afluente for superior a 250 m³/s e igual ou inferior a 500 m³/s, deve descarregar-se apenas o caudal afluente, através da abertura completa dos dois descarregadores de fundo e da abertura parcial dos descarregadores de meio-fundo;
 - c2.3.3) Se o caudal afluente for igual ou inferior a 250 m³/s, devem abrir-se totalmente os dois descarregadores de fundo.

O algoritmo desenvolvido em linguagem Matlab que executa o procedimento aqui descrito é apresentado no Anexo 4.2.

6.2.6. EXEMPLIFICAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Para ilustrar os resultados obtidos com o modelo desenvolvido, apresentam-se na Figura 82, a título de exemplo, os resultados da simulação realizada com base na previsão de afluências (10 dias) efetuada no dia 08-02-2014 – apresentada já como exemplificativa na Figura 79 – e considerando as seguintes condições iniciais:

- $N_{AG(t=0)} = 118,50$ e $N_{FR(t=0)} = 120,21$ (m)
- $Q_{efl_AG(t=0)} = 500$ e $Q_{efl_FR(t=0)} = 186$ (m³/s)

Conforme se pode observar no gráfico da Figura 90 referente à secção de Coimbra, o valor máximo total do caudal afluente a essa secção no período total de previsão (10 dias), resultante da simulação apresentada, foi de aproximadamente 1000 m³/s, mantendo-se esse valor durante um período (inicial)

de cerca de 168 horas (7 dias). Este resultado decorre da aplicação do modelo de gestão desenvolvido, através da execução de todas as etapas do fluxograma da Figura 80 (ver 6.2.3), seguindo o percurso da esquerda, ou seja, foram aplicados sequencialmente os dois módulos de otimização para os três limites definidos para o caudal máximo afluente a Coimbra (800, 900 e 1000 m³/s), sendo que os resultados obtidos correspondem à última etapa do ciclo de cálculo representado no fluxograma, ou seja, à obtenção de um caudal amortecido em Coimbra igual a 1000 m³/s. Atendendo às soluções apresentadas no final do fluxograma, como esse valor é inferior a 1200 m³/s nas primeiras 24 horas da simulação (e neste caso também nas restantes), o estabelecimento dos valores dos caudais a descarregar pelas duas albufeiras nas 24 horas seguintes deverá ter em conta os resultados do modelo de gestão das albufeiras para o dia seguinte à simulação, e também os caudais afluentes e os níveis de água medidos em tempo real nas duas albufeiras, aplicando-se assim o procedimento designado por “Solução A”, descrito em 6.2.5.

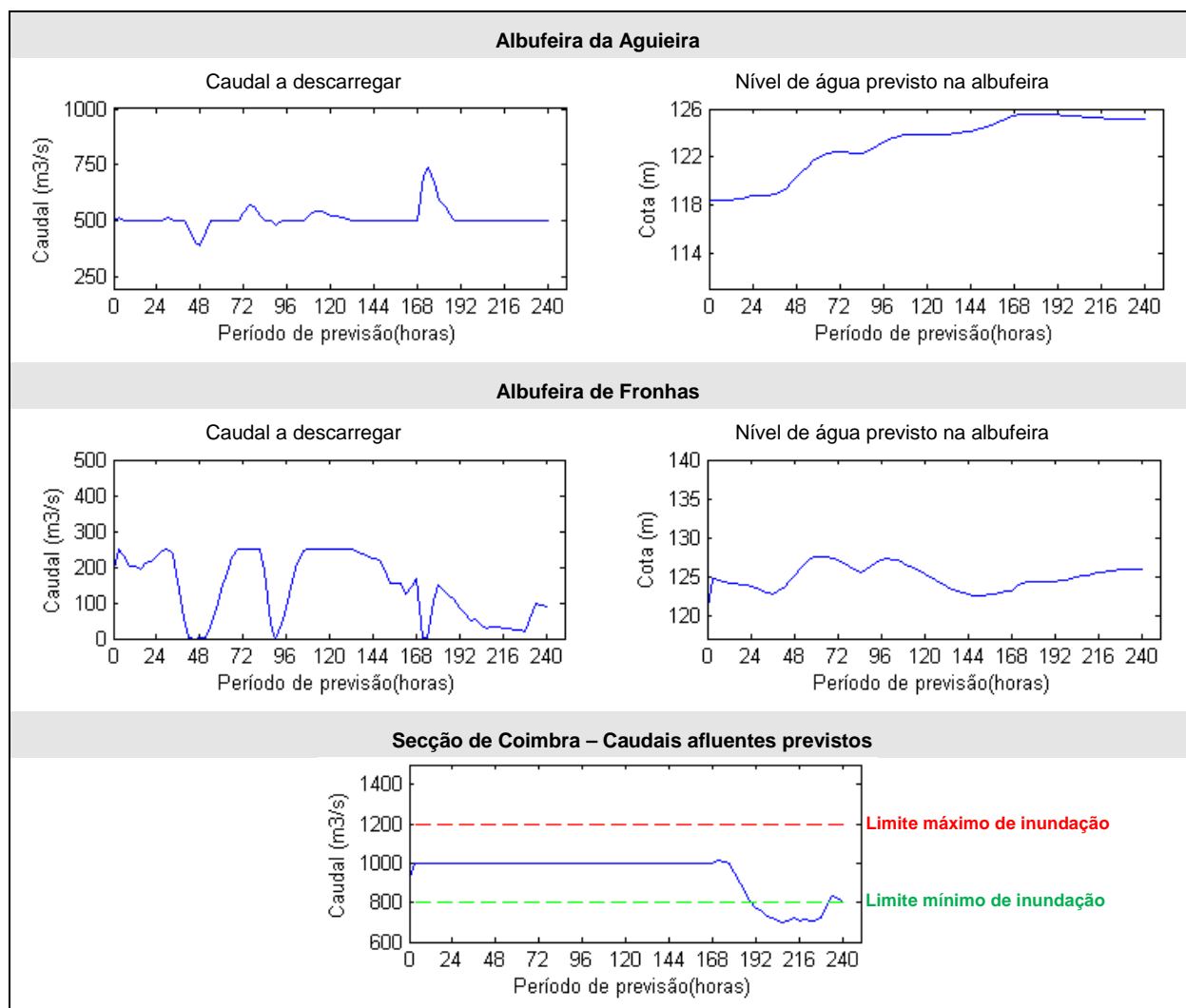


Figura 82. Resultados da simulação da gestão das albufeiras da Aguieira e de Fronhas com o modelo desenvolvido, iniciada às 00:00h do dia 08-02-2014, para os 10 dias seguintes (linhas azuis contínuas).

Ressalva-se que, como o modelo de gestão é executado com base em previsões de afluências, os resultados obtidos para os níveis de água nas albufeiras e para o caudal afluente a Coimbra correspondem também a previsões, cuja qualidade depende em grande medida da qualidade das primeiras.

6.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO DE GESTÃO OPERACIONAL DAS ALBUFEIRAS DA AGUIEIRA E DE FRONHAS EM SITUAÇÕES DE CHEIA

6.3.1. PERÍODOS SIMULADOS E TIPOS DE AVALIAÇÃO

Atendendo ao descrito em 3.6.2., a avaliação do desempenho do modelo foi realizada através da avaliação dos resultados obtidos com o mesmo para os seis períodos identificados no Quadro 22 – correspondentes a eventos de cheia com características distintas – e da comparação destes com os resultados da aplicação das regras de exploração vigentes, que foram designadas por “R2007” e “R2007+” (ver 4.4.2). Como essas regras de exploração não integram uma componente de previsão, a avaliação do desempenho do modelo, aplicado com base nas previsões de afluências, permite também avaliar o valor dessas previsões, uma vez que o resultado que a utilização das previsões terá em termos efetivos é expresso através da aplicação do modelo.

Quadro 22. Eventos de cheia e correspondentes períodos de tempo simulados para avaliação do desempenho do modelo de gestão das albufeiras da Aguieira e de Fronhas em situações de cheia.

Evento de cheia	Caudal máximo afluente (m ³ /s)		Período de tempo simulado
	Aguieira	Fronhas	
Janeiro de 2001	1810	435	17 a 29/01/2001 (12 dias)
Janeiro de 2013	657	267	15 a 29/01/2013 (15 dias)
Março de 2013	882	263	23/03 a 06/04/2013 (15 dias)
Janeiro de 2014	796	263	01 a 15/01/2014 (15 dias)
Fevereiro de 2014	1057	225	01 a 28/02/2014 (28 dias)
Janeiro de 2016	1710	248	02 a 13/02/2014 (12 dias)

Entretanto, e para testar também o funcionamento do modelo e avaliar o seu desempenho independentemente da qualidade das previsões, foram analisados adicionalmente os resultados do modelo obtidos para os períodos de cheia de janeiro de 2001 e de janeiro de 2016 – que correspondem aos períodos simulados em que ocorreram os eventos de maior magnitude em termos de caudal de ponta de cheia afluente à albufeira da Aguieira e que provocaram maiores impactos na zona marginal de Coimbra – utilizando valores observados dos caudais afluentes às duas albufeiras, como se se tratassem de previsões “perfeitas” (iguais ao que realmente foi observado).

Salienta-se desde já que, mau grado a sua importância, pela magnitude dos caudais de cheia ocorridas, as conclusões decorrentes da análise da cheia de janeiro de 2001 estão em parte limitadas pelas características dos dados de base utilizados (ver 6.3.2). Por essa razão – e apesar da cheia de janeiro de

2016 ter ocorrido já muito perto do final da realização da presente tese – devido à sua excecional magnitude foi decidido analisar também o desempenho do modelo de gestão desenvolvido para esse período de cheia.

6.3.2. DADOS DE BASE

Para aplicação do modelo aos períodos de cheia selecionados, utilizaram-se como dados de entrada os caudais de referência previstos com base nas previsões de precipitação por *ensemble*, conforme descrito em 6.2.2.

Uma vez que as previsões de precipitação realizadas pelo ECMWF em 2001 tinham uma resolução inferior à atual – mantida desde janeiro de 2010 (ver 3.3.1) – o período de cheia de janeiro de 2001 foi simulado com os caudais de referência previstos de forma análoga aos obtidos para os períodos mais recentes, mas tendo por base as previsões de precipitação por *ensemble* realizadas nas datas correspondentes, cujas resoluções horizontais são de aproximadamente 40 km nos dados HRES e 80 km nos dados do ENS – constituído também por 51 membros. Na realidade, apesar da referida necessidade de realizar um ajuste no processamento dos dados de precipitação para realizar as previsões hidrológicas correspondentes e de não ter sido avaliada a qualidade das previsões obtidas, considerou-se conveniente avaliar também o desempenho do modelo para o evento de cheia de janeiro de 2001 porque, como já se referiu em 4.5.2, foi um evento de elevada excecionalidade, e o que teve impactos mais gravosos nos últimos 15 anos.

Conforme referido na secção anterior, o modelo foi também aplicado utilizando os valores reais dos caudais afluentes às albufeiras da Aguieira e de Fronhas, como se se tratassem de previsões perfeitas. Nesse cenário, e como não se dispunha de registos de caudais nas sub-bacias não regularizadas a montante de Coimbra, foram utilizados em substituição desses dados os caudais de referência previstos para essas sub-bacias.

Para simulação das regras de exploração “R2007” e “R2007+”, como estas dependem essencialmente do caudal médio afluente à albufeira da Aguieira no dia anterior à simulação e dos caudais afluentes e níveis de água medidos em tempo real nas duas albufeiras, os dados de base utilizados para simular estas regras englobaram também os caudais reais afluentes às albufeiras da Aguieira e de Fronhas e ainda – pela razão anteriormente exposta – os caudais de referência previstos nas sub-bacias não regularizadas a montante dessa cidade, de modo a avaliar o impacto da exploração nas cheias em Coimbra.

Na aplicação do modelo para a simulação dos vários períodos de cheia foram consideradas as seguintes condições iniciais:

- no início do primeiro dia, considerou-se que o caudal efluente das duas albufeiras é igual a zero e que os níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas são, respetivamente, iguais a 122 m e 126 m;
- no início dos restantes dias, essas condições foram obtidas através dos resultados da gestão realizada no dia anterior.

Na utilização das regras de exploração “R2007” e “R2007+”, utilizaram-se as condições iniciais definidas nessas regras em função dos valores dos caudais afluentes e dos níveis de água nas albufeiras registados no dia anterior e no momento inicial de cada simulação (ver 4.4.2).

6.3.3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Nesta secção apresentam-se e comparam-se os resultados das simulações dos vários períodos de cheia estabelecidos em 6.3.1 com as regras de exploração vigentes e com a aplicação do modelo de gestão desenvolvido.

Seguidamente, em 6.3.3.1, realiza-se a apresentação e a respetiva discussão dos resultados obtidos para o período de cheia de fevereiro de 2014, que corresponde a uma situação de cheia “intermédia”, em que o caudal afluente a Coimbra ultrapassou o valor de $800 \text{ m}^3/\text{s}$ – que corresponde ao primeiro limiar de inundação definido, a partir do qual as áreas marginais da cidade de Coimbra são inundadas pelo rio Mondego – mas não atingiu o valor de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ – que é o limiar máximo de inundação estabelecido para essa secção e o valor preconizado para o caudal da cheia centenária amortecida em Coimbra. Dos períodos de cheia analisados na presente tese, indicados no Quadro 22, correspondem a esta descrição os eventos ocorridos em janeiro e março de 2013 e em janeiro e fevereiro de 2014. Por essa razão, optou-se por realizar a exposição detalhada dos resultados apenas para um desses casos, tendo-se escolhido o período de cheia maior e no qual se registou o maior valor de caudal afluente à Aguieira.

Depois, em 6.3.3.2, são apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada um dos dois períodos de cheia que tiveram impactos mais significativos, referentes aos eventos ocorridos, respetivamente, em janeiro de 2001 e janeiro de 2016. Em ambas as situações foi registado um caudal afluente a Coimbra superior ao limiar máximo de inundação estabelecido para essa secção ($1200 \text{ m}^3/\text{s}$).

Os resultados obtidos para os três restantes períodos simulados são apresentados no Anexo 5. Não obstante, no final (em 6.3.3.3) é realizada uma análise geral dos resultados obtidos para todos os períodos de cheia considerados, tendo por base os indicadores de desempenho estabelecidos em 3.6.2.

Ressalva-se desde logo que, como as aflúncias das sub-bacias não regularizadas a montante de Coimbra, que contribuem para os resultados obtidos, não correspondem aos valores reais – mas a previsões, conforme explicado em 6.3.2 – as observações relativas aos resultados obtidos para a secção de Coimbra devem ser interpretadas de forma condicionada, isto é, permitem comparar os vários procedimentos em análise, mas não possibilitam extrair inferências sobre o que, na realidade, se poderia ter verificado nessa secção do rio.

6.3.3.1. Análise dos resultados relativos ao período de cheia de fevereiro de 2014

Nas Figuras 83 a 85, apresentam-se os resultados da gestão das albufeiras da Aguieira-Raiva-Fronhas obtidos para o período de 01 a 28/02/2014, utilizando, respetivamente, as regras de exploração

“R2007” e “R2007+” e o modelo de gestão desenvolvido, aplicado com as previsões das aflúências, conforme descrito em 6.3.1 e 6.3.2.

Cada uma dessas figuras é composta por cinco gráficos, onde se apresentam sequencialmente, de cima para baixo, os seguintes resultados:

- a) os caudais na secção da barragem da Aguieira: i) os caudais afluentes reais, representados pela linha azul a traço interrompido; e ii) os caudais efluentes calculados – pelas regras de exploração ou pelo modelo desenvolvido, conforme for o caso – representados pela linha verde contínua;
- b) os níveis de água na albufeira da Aguieira: i) os níveis calculados – através da aplicação das regras de exploração vigentes ou do modelo desenvolvido, conforme for o caso – representados pela linha azul;
- c) os caudais na secção da barragem de Fronhas, com a informação correspondente à apresentada para a secção da Aguieira (primeiro gráfico);
- d) os níveis de água na albufeira de Fronhas, com a informação correspondente à apresentada para a secção da Aguieira (segundo gráfico);
- e) os caudais afluentes a Coimbra: i) os caudais afluentes calculados – através da aplicação das regras de exploração vigentes ou do modelo desenvolvido na gestão das albufeiras da Aguieira e de Fronhas, conforme for o caso, e da consideração das aflúências das sub-bacias não regularizadas a montante dessa secção obtidas através das previsões hidrológicas realizadas, conforme descrito em 6.3.2 – representados pela linha preta;

Após a apresentação dos resultados é realizada uma breve discussão dos mesmos.

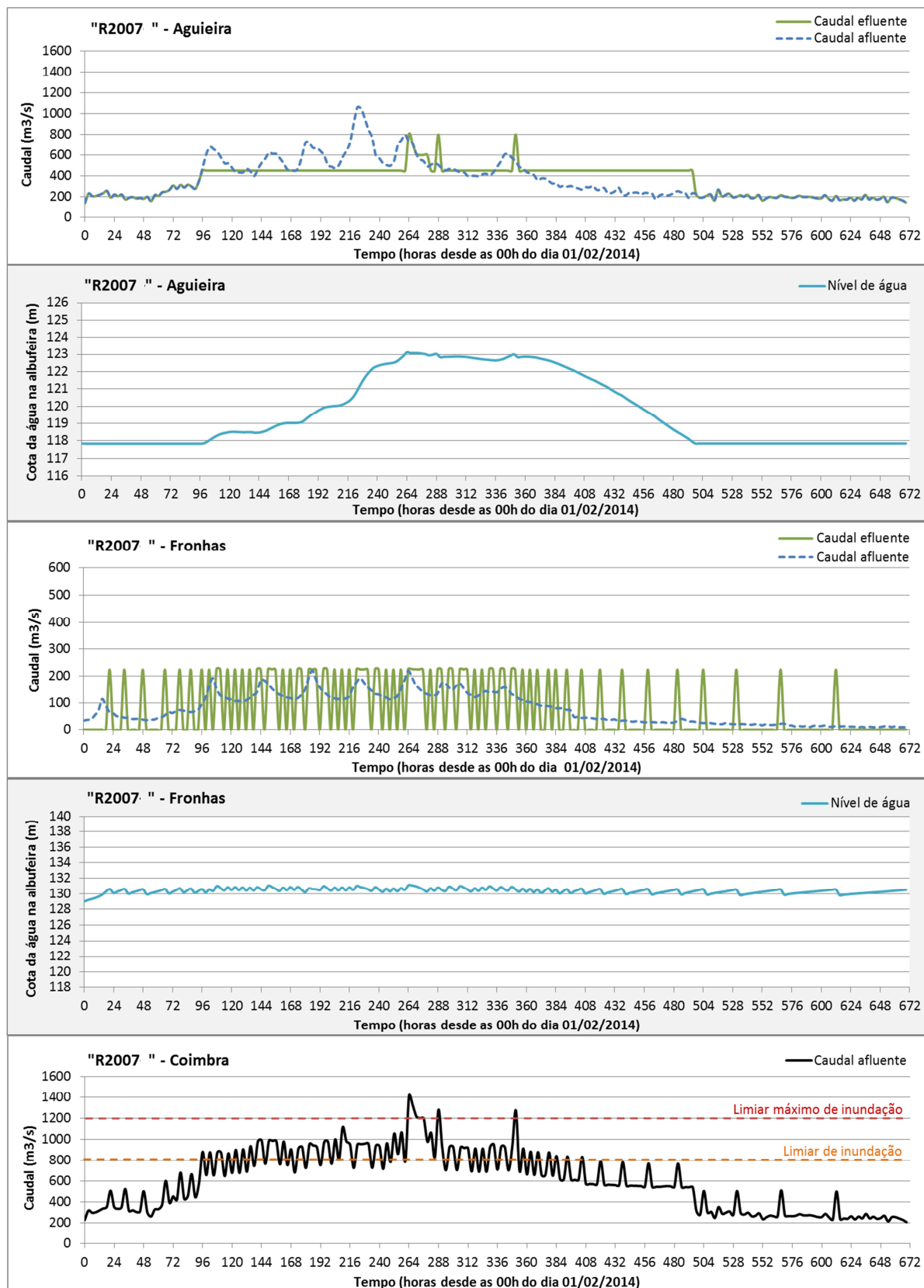


Figura 83. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando as regras de exploração "R2007". Período de simulação: 01 a 28/02/2014.

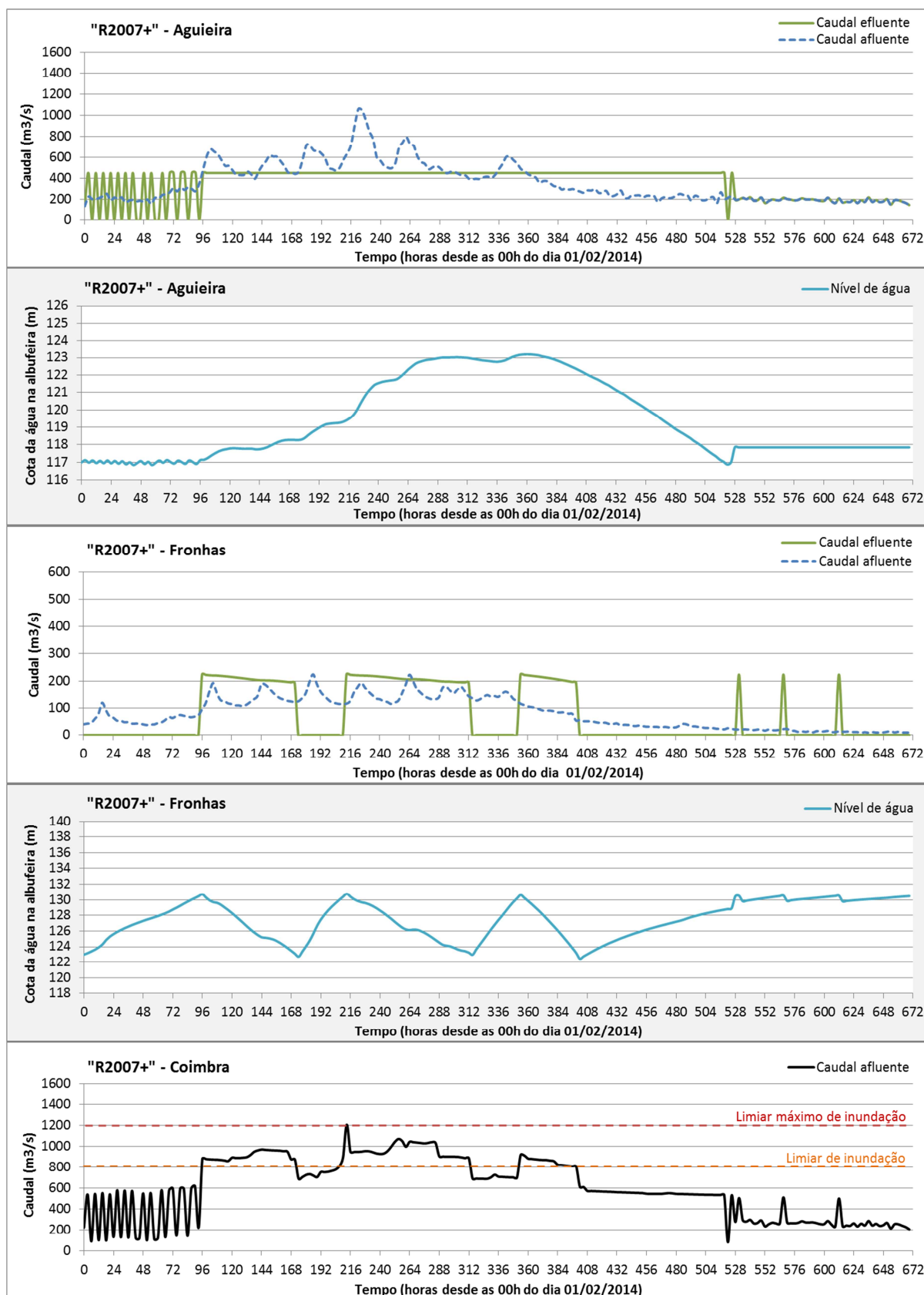


Figura 84. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando as regras de exploração "R2007+". Período de simulação: 01 a 28/02/2014.

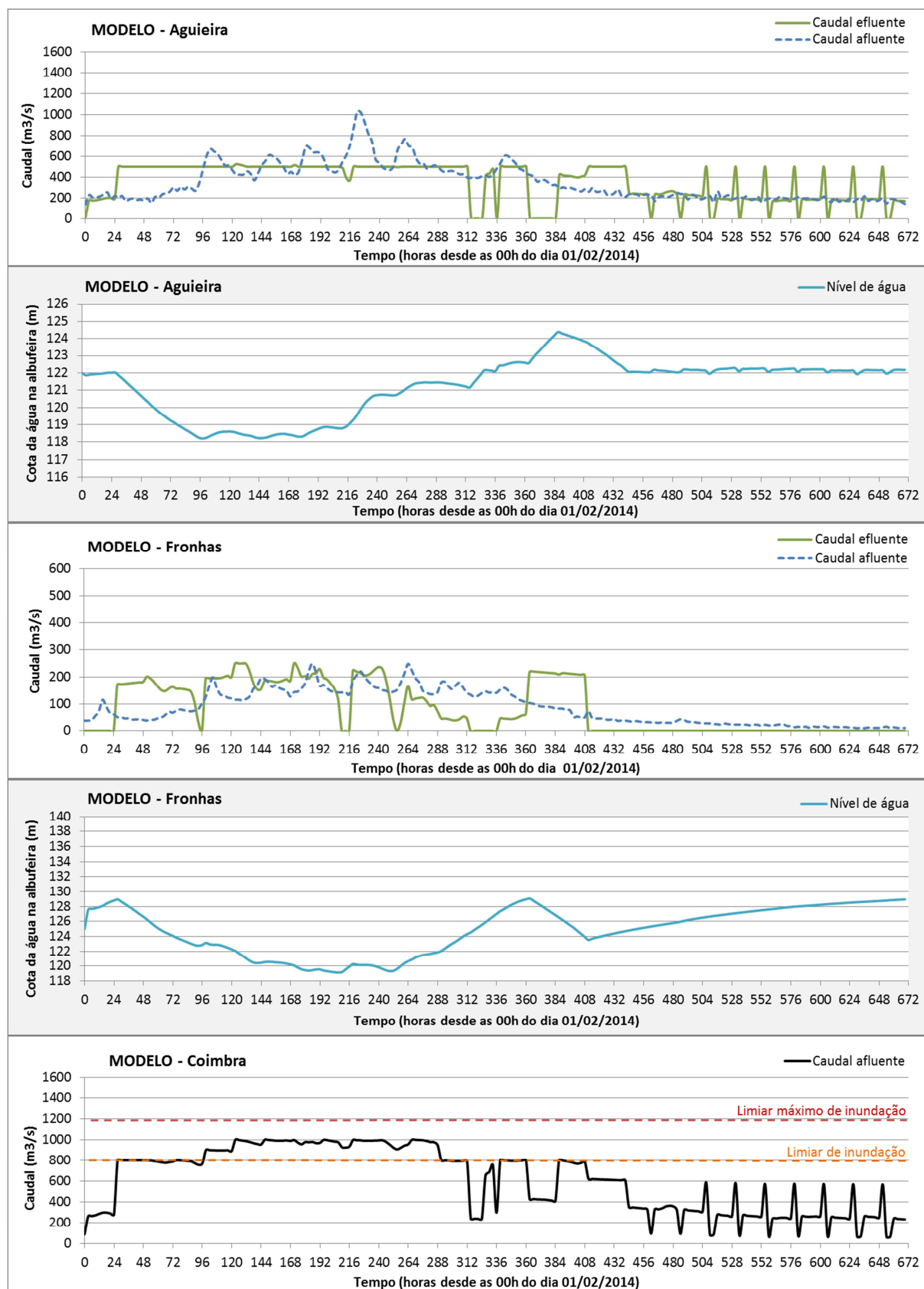


Figura 85. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando o modelo de gestão de albufeiras desenvolvido. Período de simulação: 01 a 28/02/2014.

Observando as Figuras 83 a 84, que apresentam, respetivamente, os resultados correspondentes à aplicação das regras de exploração “R2007” e “R2007+”, pode-se concluir, desde logo, que a utilização das regras mais recentes teria originado um menor caudal de pico de cheia em Coimbra (cerca de 200 m³/s inferior). Essa constatação é evidenciada pelos valores dos caudais afluentes a essa secção representados no gráfico inferior de cada figura, mas pode ser inferida também com base nos resultados dos caudais efluentes das albufeiras da Aguieira e de Fronhas, uma vez que os dados relativos aos caudais gerados nas sub-bacias não regularizadas são os mesmos.

Atentando, do mesmo modo, na Figura 85, e comparando com os resultados das regras anteriores, constata-se que a utilização do modelo de gestão com base nas previsões de afluências exhibe os melhores resultados em relação aos caudais de cheia afluentes a essa secção, apresentando o menor valor de pico (menos 200 m³/s de que com as regras “R2007+”). Além disso, pode-se observar também que o tempo de duração das inundações provocadas pelas cheias no período simulado, ou seja, o tempo de permanência de caudais superiores a 800 m³/s, é menor com a utilização do modelo do que com a aplicação dos outros dois conjuntos de regras considerados nesta análise.

Atendendo aos resultados apresentados nas três figuras, observa-se ainda que, com a utilização do modelo, o limiar máximo de inundação estabelecido (1200 m³/s) não foi ultrapassado, o que aconteceu porém com a aplicação dos outros conjuntos de regras. Com a aplicação das regras “R2007+”, essa ocorrência foi apenas pontual e o valor excedido foi muito pequeno (cerca de 6 m³/s), enquanto que, com as regras mais antigas, essa ocorrência foi mais pronunciada em termos de duração e de magnitude.

Da análise efetuada, pode-se concluir que, neste caso, a utilização do modelo de gestão com base nas previsões de afluências realizadas teria sido claramente mais vantajosa do que a aplicação das regras atualmente estabelecidas, minimizando, quer o caudal máximo afluente a Coimbra, quer o número de horas de inundação.

Na Figura 85 observa-se também o estabelecimento pelo modelo de um valor superior dos NME – face aos definidos nas regras de exploração em vigor – das duas albufeiras nos primeiros dias do período de simulação, a diminuição desses níveis nos dias anteriores à ocorrência da cheia – de modo a aumentar o volume de encaixe necessário ao amortecimento dos caudais afluentes previstos – e a reposição dos níveis iniciais após o final da situação de cheia. Com este procedimento, o modelo permite manter níveis de água elevados nas albufeiras durante os períodos em que não há previsões de afluência significativas, o que é potencialmente benéfico para as restantes utilizações do sistema de albufeiras.

6.3.3.2. Análise dos resultados relativos aos períodos de cheia de janeiro de 2001 e janeiro de 2016

Seguidamente, nas Figuras 86 a 89, apresentam-se os resultados da gestão das albufeiras da Aguieira-Raiva-Fronhas obtidos para o período de 18 a 29/01/2001, e posteriormente, nas Figuras 90 a 93, apresentam-se os correspondentes resultados obtidos para o período de 02 a 13/01/2016, utilizando, respetivamente, as regras de exploração “R2007” e “R2007+” e o modelo de gestão desenvolvido,

aplicado primeiro com as previsões das afluições e depois com as afluições reais, conforme descrito em 6.3.1 e 6.3.2.

Similarmente ao apresentado para os resultados anteriores, cada uma dessas figuras é composta por cinco gráficos, onde se apresentam sequencialmente, de cima para baixo, os seguintes resultados:

- f) os caudais na secção da barragem da Aguieira: i) os caudais afluentes reais, representados pela linha azul a traço interrompido; ii) os caudais efluentes calculados – pelas regras de exploração ou pelo modelo desenvolvido, conforme for o caso – representados pela linha verde contínua; e iii) os caudais efluentes reais – resultantes da exploração da albufeira que foi efetivamente realizada – representados pela linha amarela;
- g) os níveis de água na albufeira da Aguieira: i) os níveis calculados – através da aplicação das regras de exploração vigentes ou do modelo desenvolvido, conforme for o caso – representados pela linha azul; e ii) os níveis reais – resultantes da exploração da albufeira que foi efetivamente realizada – representados pela linha amarela;
- h) os caudais na secção da barragem de Fronhas, com a informação correspondente à apresentada para a secção da Aguieira (primeiro gráfico);
- i) os níveis de água na albufeira de Fronhas, com a informação correspondente à apresentada para a secção da Aguieira (segundo gráfico);
- j) os caudais afluentes a Coimbra: i) os caudais afluentes calculados – através da aplicação das regras de exploração vigentes ou do modelo desenvolvido na gestão das albufeiras da Aguieira e de Fronhas, conforme for o caso, e da consideração das afluições das sub-bacias não regularizadas a montante dessa secção obtidas através das previsões hidrológicas realizadas, conforme descrito em 6.3.2 – representados pela linha preta; e ii) os caudais afluentes reais – resultantes da exploração efetivamente realizada das duas albufeiras e das afluições reais das sub-bacias não regularizadas – representados pela linha amarela.

Salienta-se que os valores reais dos caudais afluentes a Coimbra são apresentados unicamente como referência, não se podendo estabelecer conclusões absolutas através da comparação desses dados com os resultados da aplicação das regras estabelecidas e/ou do modelo desenvolvido nessa secção, uma vez que, como anteriormente referido, as afluições das sub-bacias não regularizadas a montante de Coimbra que contribuem para os resultados obtidos não correspondem aos valores reais.

Após a apresentação dos resultados para cada um dos períodos indicados é realizada uma breve discussão dos mesmos.

Resultados para o período de cheia de janeiro de 2001

Passa-se a apresentar os resultados relativos ao período de cheia de janeiro de 2001 (18 a 29/01/2001), nas Figuras 86 a 89.

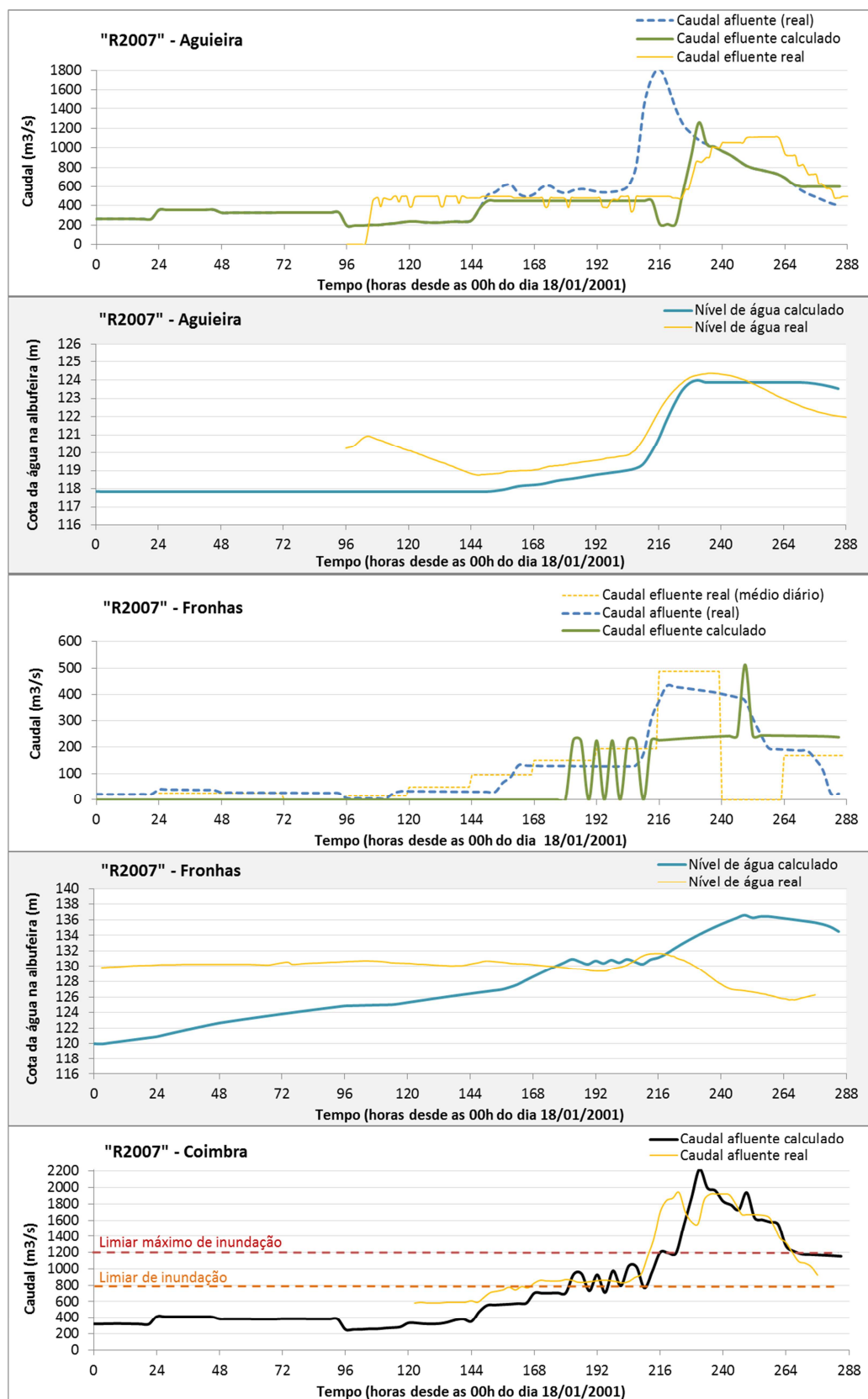


Figura 86. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Agueira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 18 a 29/02/2001, utilizando as regras de exploração "R2007".

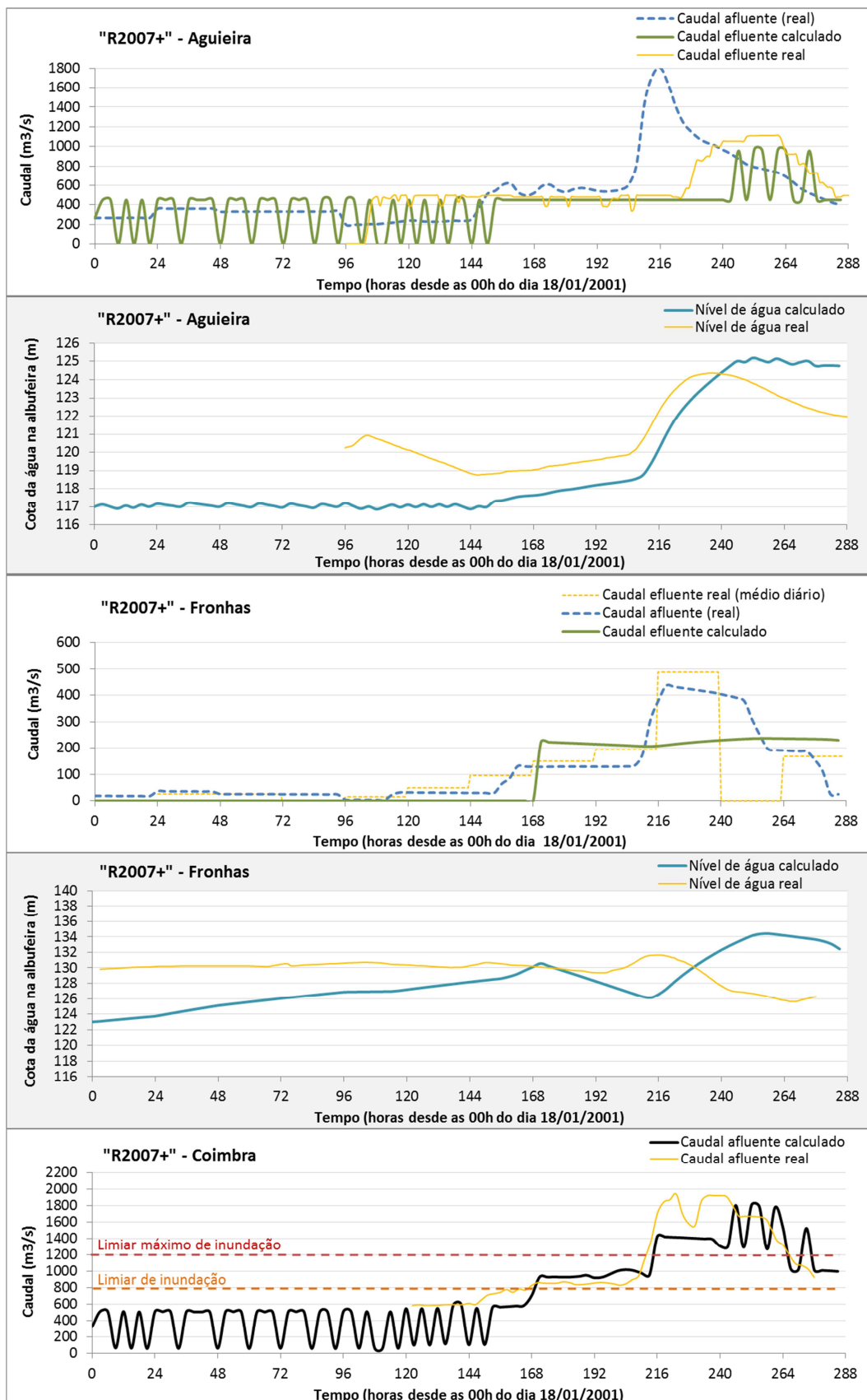


Figura 87. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 18 a 29/02/2001, utilizando as regras de exploração "R2007+".

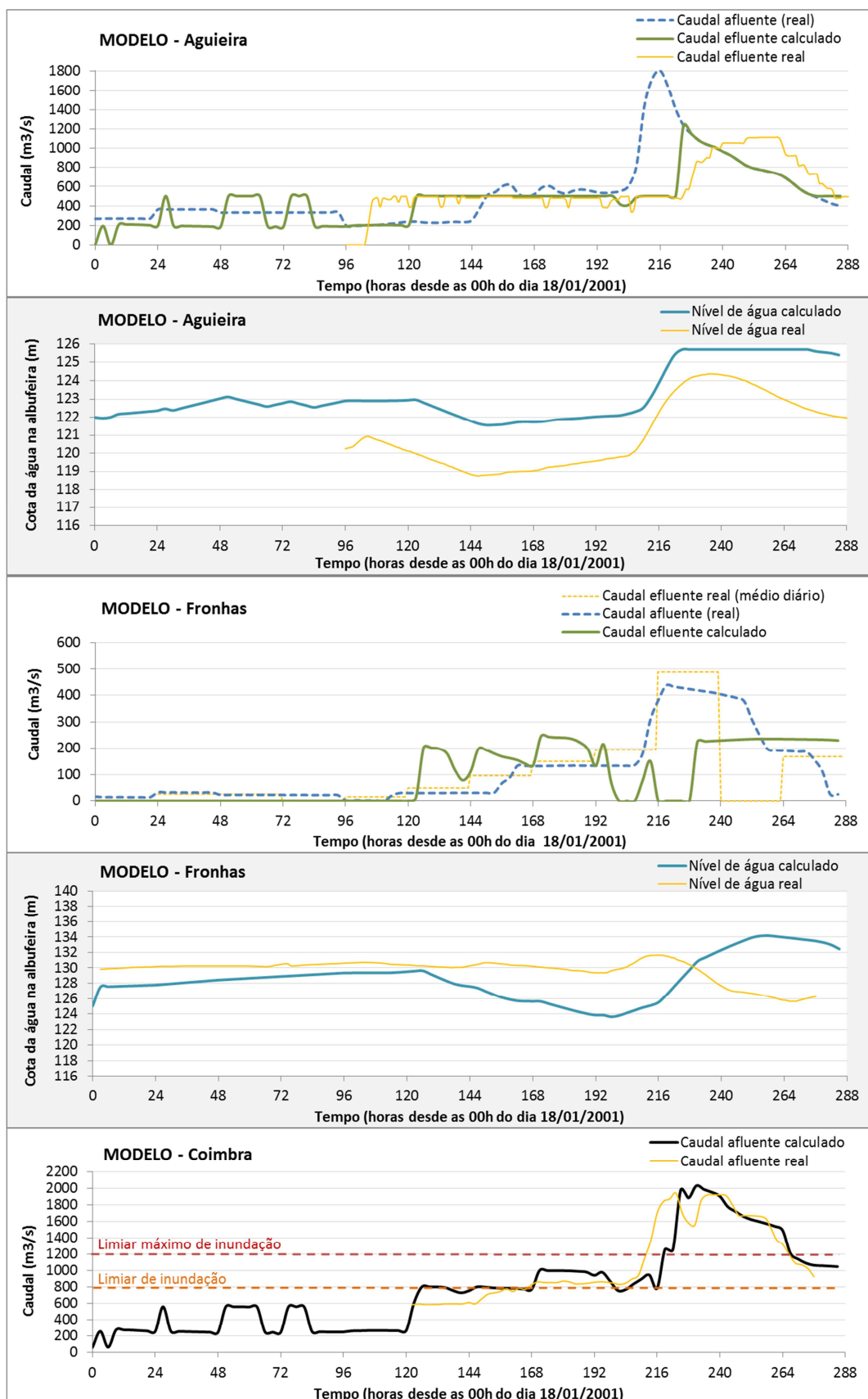


Figura 88. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 18 a 29/02/2001, utilizando o modelo desenvolvido com os caudais afluentes previstos.

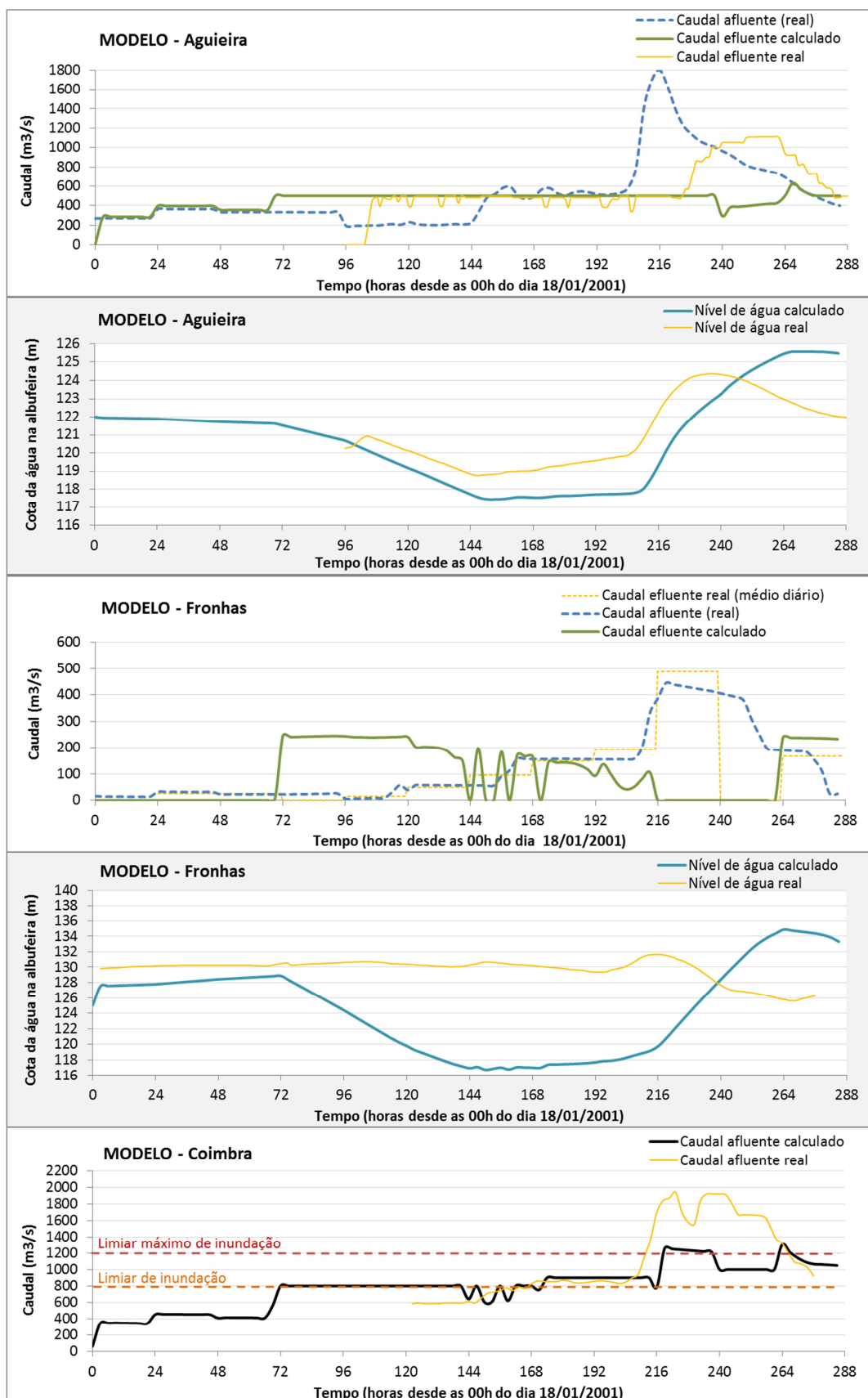


Figura 89. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 18 a 29/02/2001, utilizando o modelo desenvolvido com os caudais afluentes reais.

Atentando nas Figuras 86 a 89, é de salientar que os dados reais relativos à exploração das duas albufeiras – caudais efluentes e níveis de água – e aos caudais afluentes a Coimbra provieram de fontes distintas, e por isso apresentam extensões temporais diferentes. Os dados relativos à exploração da Aguieira foram fornecidos pela EDP, conforme referido em 4.6; os dados referentes à exploração da albufeira de Fronhas foram obtidos através da base de dados do SNIRH, pelo que, dadas as características dos dados aí disponibilizados, os caudais efluentes representados correspondem a valores médios diários; em relação aos caudais reais afluentes a Coimbra, estes dados foram obtidos no estudo realizado por Rodrigues *et al.* (2001), onde foi realizada a análise das cheias ocorridas nesse período, relativamente à sua excecionalidade e ao funcionamento dos mecanismos de vigilância e alerta de cheias existentes aquando da ocorrência do evento, nomeadamente no que diz respeito ao SVARH (ver 2.6.2).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 86, a exploração real das albufeiras não seguiu as regras pré-estabelecidas vigentes a essa data, ou seja, as regras “R2007”, visto que os caudais efluentes e os níveis de água nas duas albufeiras, calculados com base nessas regras, não correspondem aos valores reais apresentados.

Comparando os valores dos caudais afluentes a Coimbra calculados com os dois conjuntos de regras de exploração – “R2007” e “R2007+” – conclui-se que, também neste caso, a utilização das regras mais recentes teria originado um menor caudal de pico de cheia nessa secção, embora, neste caso, os resultados da aplicação de qualquer uma dessas regras tivessem conduzido à excedência, com uma grande margem, do limiar máximo de inundação estabelecido, durante cerca de 2 dias. Essa situação deve-se às características excecionais do evento – magnitude e variação espacial e temporal, conforme descrito no estudo de Rodrigues *et al.* (2001) acima referido – e à gestão da albufeira da Aguieira. Em primeiro lugar, de acordo com os resultados da aplicação das regras “R2007+”, o nível de água dessa albufeira encontrava-se na cota 117 m aquando do aumento acentuado do caudal afluente às albufeiras que ocorreu no início do dia 24/01/2001 (correspondente à abcissa 144 dos gráficos apresentados) – que precedeu à situação de cheia ocorrida nos dias seguintes –, ou seja, 0,85 m abaixo do nível de referência das regras “R2007” para a mesma situação, o que implicaria um maior volume de encaixe caso fossem aplicadas as regras mais recentes. Se, desse ponto de vista, as regras “R2007+” são mais prudentes, impondo para essa situação e para os restantes cenários de afluências considerados um NME menor que as regras anteriores, por outro lado, numa situação de cheia, as regras “R2007+” permitem atingir um maior nível de água nessa albufeira, estabelecendo que a abertura das comportas dos descarregadores de cheia se fará apenas quando for ultrapassado o nível de água correspondente à cota 125 m (definido como NDO), em contraponto às regras anteriores, que o fariam a partir da cota 123 m (ver 4.4.2). Na realidade, se, por um lado, o aumento do valor do NDO promove a existência de um maior volume de encaixe de cheia, por outro lado, pode aumentar o risco do seu eventual galgamento, na eventualidade de ocorrência de caudais afluentes superiores à capacidade total de vazão dos órgãos de descarga.

Relativamente à aplicação do modelo desenvolvido com os caudais afluentes previstos, observando os resultados apresentados na Figura 88, verifica-se que o valor de pico do caudal afluente a Coimbra foi

superior (em cerca de $200 \text{ m}^3/\text{s}$) ao obtido com as regras “R2007+”, mas inferior (também em cerca de $200 \text{ m}^3/\text{s}$) ao obtido com as regras “R2007”.

No entanto, na Figura 89, que apresenta os resultados da aplicação do modelo desenvolvido com os caudais reais (integrados como se fossem previsões “perfeitas”), observa-se que o caudal máximo afluente a Coimbra no período simulado foi significativamente inferior aos obtidos com as regras de exploração pré-estabelecidas, e que, ainda assim, conduziu a que fosse ultrapassado o limiar máximo estabelecido. Estes resultados vêm sustentar a conclusão obtida no estudo realizado pela EDP (EDP, 2003) em que é referido que a capacidade da albufeira da Aguieira para limitar o caudal afluente a Coimbra ao valor de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ depende da forma e do volume do hidrograma afluente a essa albufeira, e que não é possível garantir que este valor não seja ultrapassado para cheias com período de retorno inferior a 100 anos, como se verificou na cheia de janeiro de 2001.

Através da comparação dos resultados da aplicação do modelo com os dois tipos de dados (previstos e reais), pode-se concluir que o desempenho do modelo está diretamente relacionado com a qualidade das previsões das afluições que tem na sua base, ou seja, quanto melhor for a qualidade das previsões, melhor será o desempenho do modelo de gestão de albufeiras. Ressalva-se novamente aqui que, no período da cheia de janeiro de 2001, as previsões de precipitação do ECMWF que suportaram a obtenção das afluições previstas utilizadas na simulação deste evento – cujos resultados são apresentados na Figura 88 – resultaram de uma versão do modelo atmosférico mais antiga e com menor resolução do que a atual, cuja qualidade de previsão não foi avaliada no âmbito deste estudo. Não obstante, observando na Figura 88 a diminuição do nível de água nas duas albufeiras iniciada no dia 23/01/2001 (correspondente à abcissa 120 dos gráficos apresentados), é evidente que a ocorrência do evento de cheia foi prevista com pelo menos três dias de antecedência pelas previsões das afluições consideradas, mas que a magnitude do mesmo foi subestimada pelas previsões.

Ainda assim, nesta situação de cheia, a utilização do modelo de gestão com a incorporação das previsões existentes revelou-se vantajosa em relação à utilização das regras de exploração “R2007” e R2007+”, uma vez que os resultados obtidos em termos de caudal de ponta de cheia foram próximos (cerca de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ de diferença, para valores de caudais da ordem dos $2000 \text{ m}^3/\text{s}$), mas a exploração das albufeiras não foi condicionada tão prematuramente – mantendo os níveis de água nas albufeiras a uma cota mais elevada, e durante um maior período de tempo – como indicado pelas regras de exploração que não entram em conta com previsões de afluições.

Através da análise dos resultados apresentados na Figura 88 e na Figura 89, infere-se que o modelo permite adotar, nas situações normais de exploração, em que não há previsão de cheias, um valor superior do NME das duas albufeiras relativamente aos definidos nas regras de exploração em vigor, diminuindo esses níveis apenas nos dias anteriores à ocorrência da cheia, aumentando assim o volume de encaixe necessário ao amortecimento dos caudais afluentes previstos. Porém, conforme já referido anteriormente, também aqui se constata que esse desempenho está dependente da qualidade das previsões dos caudais afluentes.

Resultados para o período de cheia de janeiro de 2016

De seguida, nas Figuras 90 a 93, apresentam-se os resultados relativos ao período da cheia de janeiro de 2016 (02 a 13/01/2016).

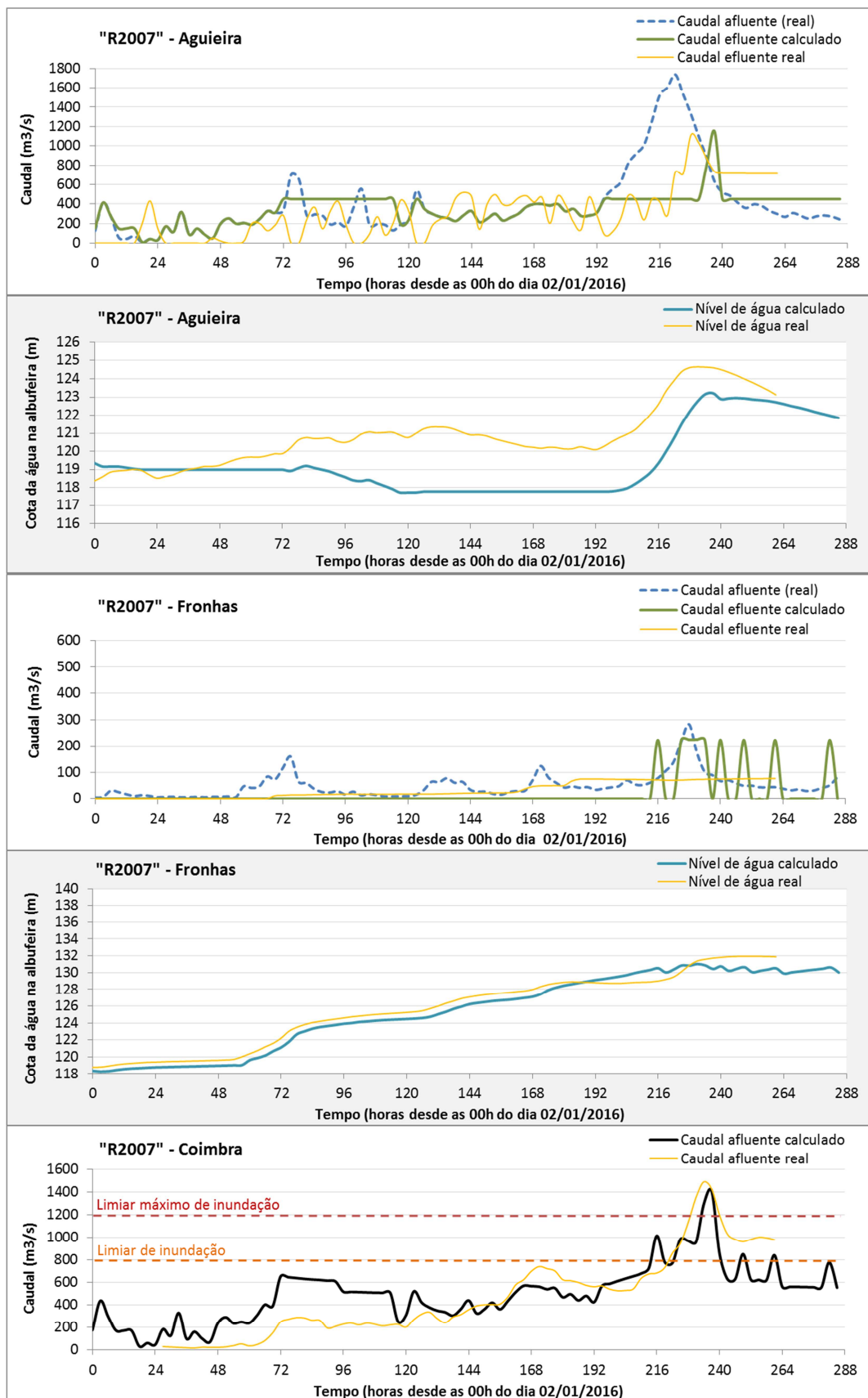


Figura 90. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Agueira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 2 a 13/01/2016, utilizando as regras de exploração "R2007".

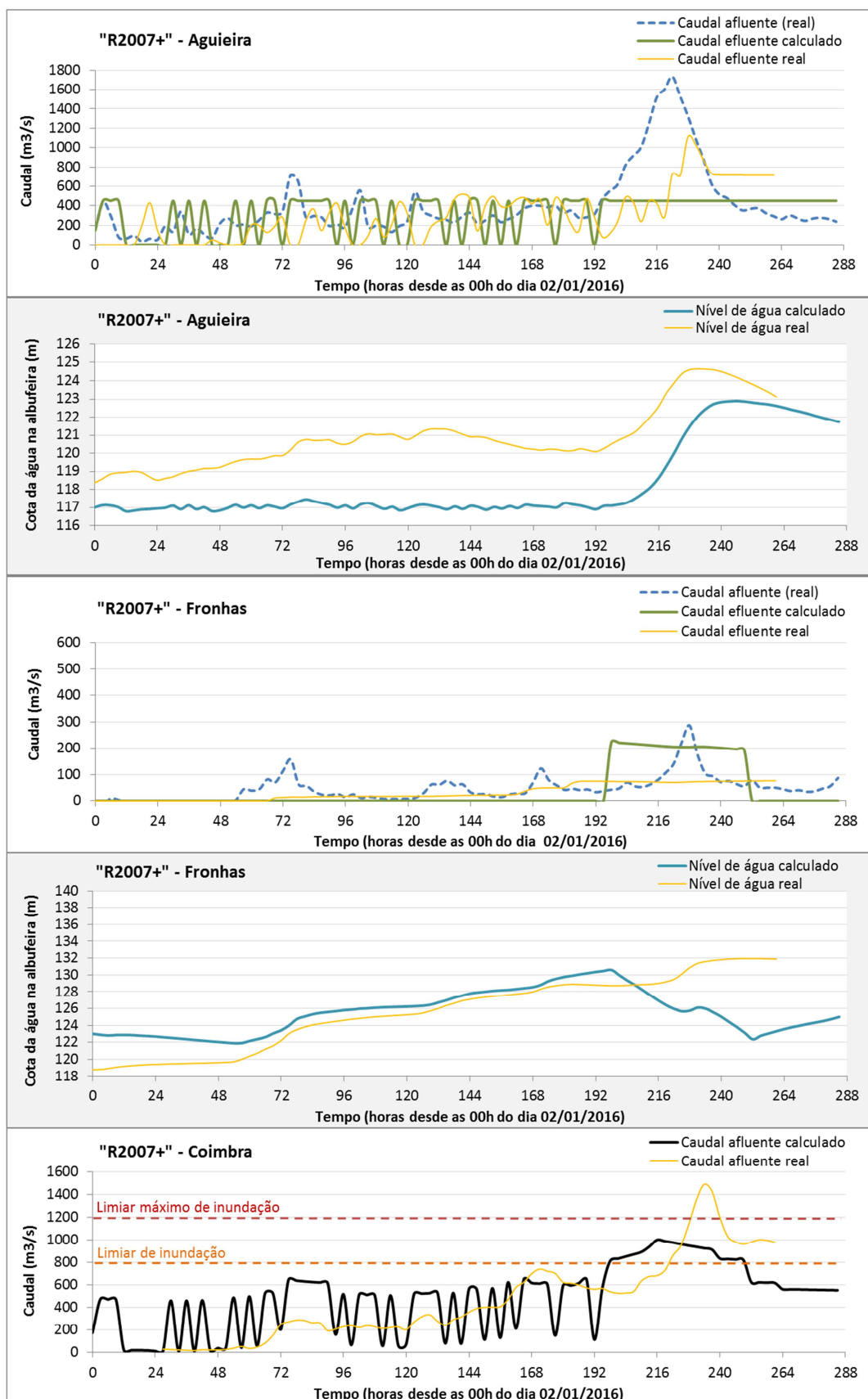


Figura 91. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 2 a 13/01/2016, utilizando as regras de exploração "R2007+".

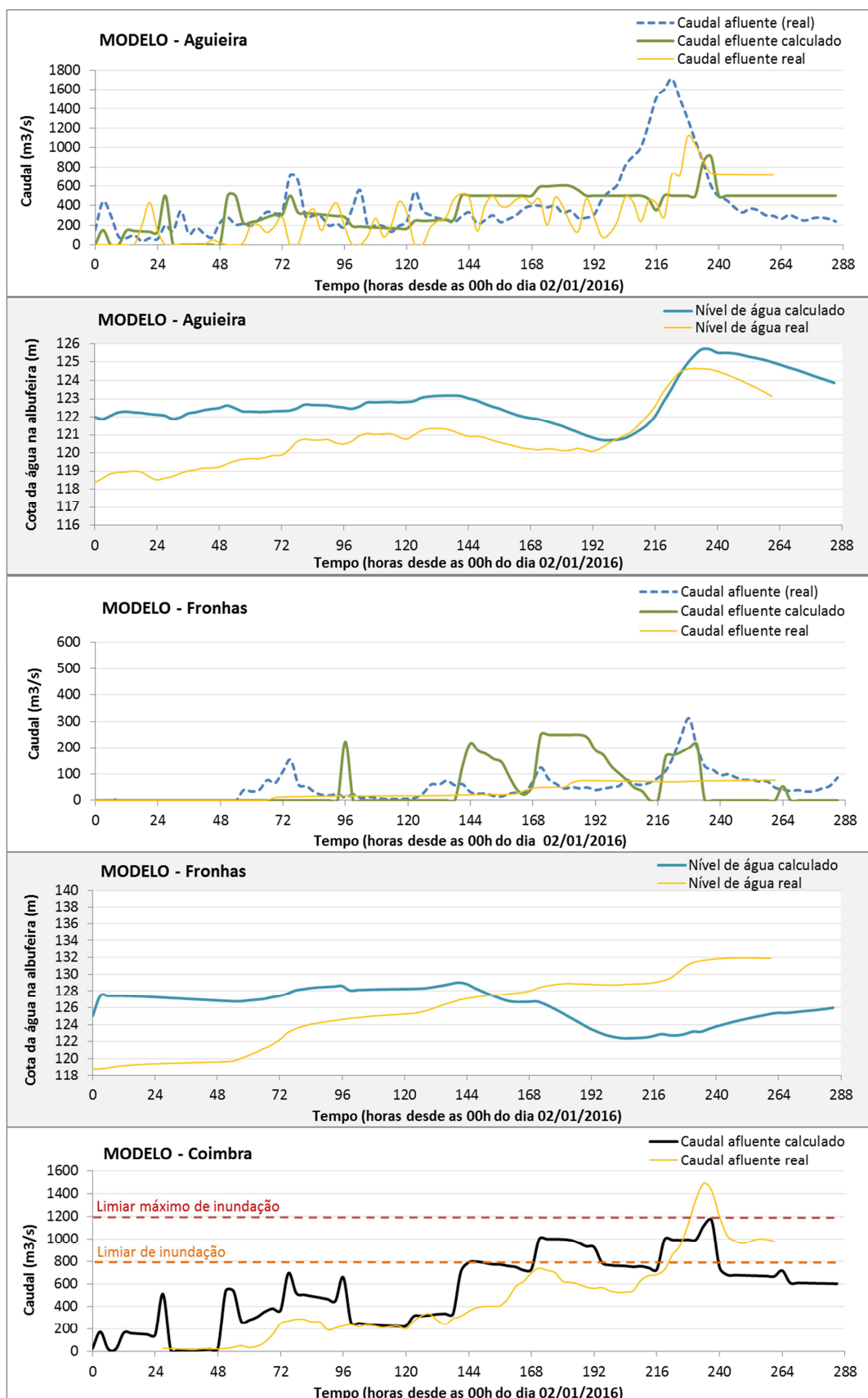


Figura 92. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 2 a 13/01/2016, utilizando o modelo desenvolvido com os caudais afluente previstos.

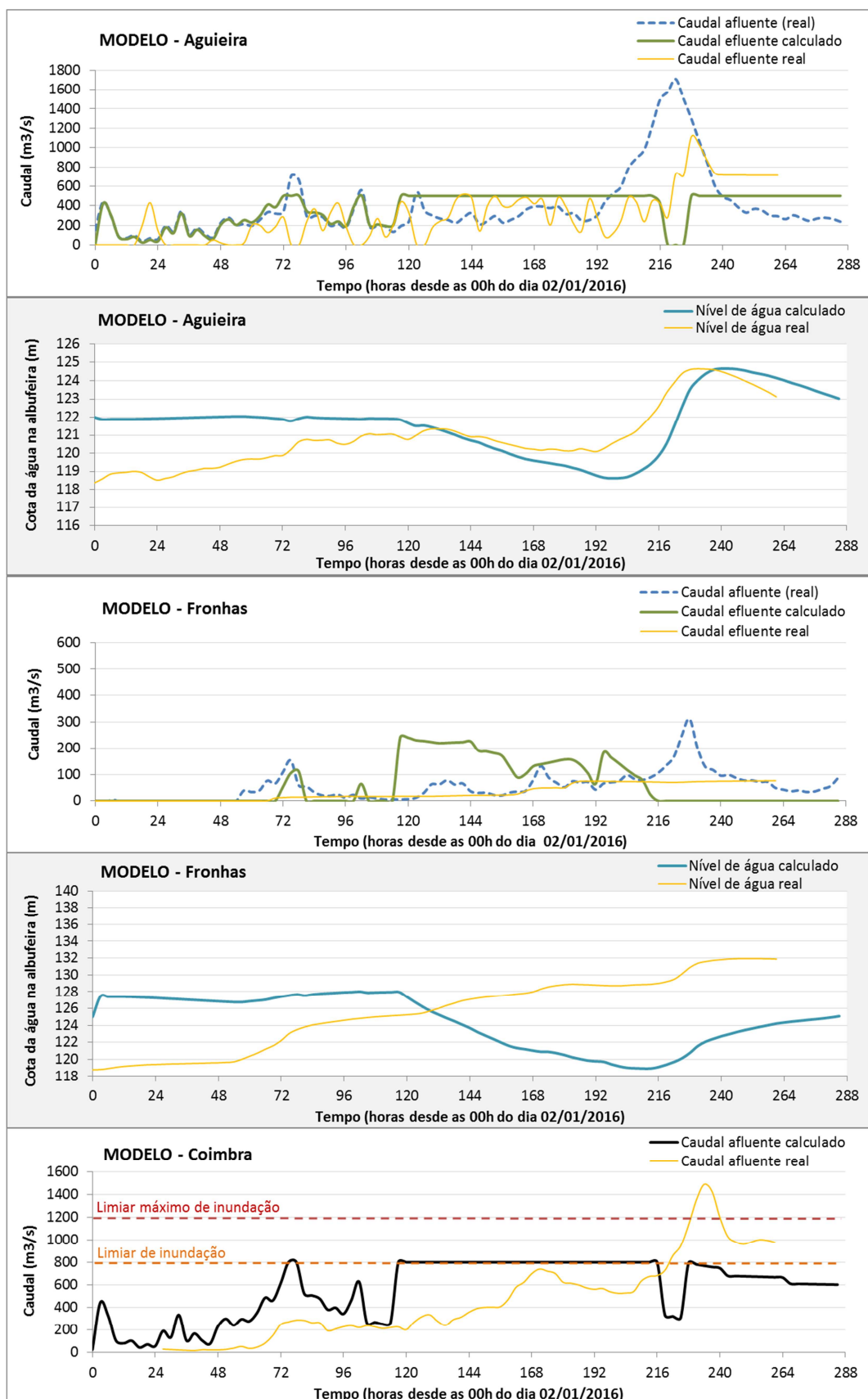


Figura 93. Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Agueira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos para o período de 2 a 13/01/2016, utilizando o modelo desenvolvido com os caudais afluente reais.

Conforme se pode observar nas Figura 90 e 91, a exploração real das albufeiras não seguiu propriamente nenhum dos conjuntos de regras pré-estabelecidas – nem as regras “R2007” (Figura 90), nem as regras “R2007+” (Figura 91) – uma vez que os caudais efluentes e os níveis de água calculados com base nessas regras não correspondem aos valores reais da exploração. Contudo, as decisões tomadas na exploração do sistema aproximaram-se mais do conjunto de regras mais antigas, ou seja, das regras “R2007”. No entanto, comparando os valores dos caudais afluentes a Coimbra calculados com esses dois conjuntos de regras de exploração, pode concluir-se que a utilização das regras “R2007+” teria provocado um menor valor do caudal de pico de cheia em Coimbra, não tendo os resultados correspondentes chegado ao limiar máximo de inundação estabelecido ($1200 \text{ m}^3/\text{s}$). Essa situação deveu-se essencialmente, neste caso, à gestão da albufeira da Aguieira, do mesmo modo que foi constatado e explicado anteriormente para o caso do período de cheia de janeiro de 2001.

Relativamente à aplicação do modelo desenvolvido com os caudais afluentes previstos, observando os resultados apresentados na Figura 92, verifica-se que o valor de pico do caudal afluente a Coimbra não atingiu o limiar máximo de inundação estabelecido, o qual, na realidade, foi ultrapassado. Porém, comparando com os correspondentes valores da Figura 91, foi superado (em cerca de $200 \text{ m}^3/\text{s}$) o valor do caudal máximo atingido em Coimbra com a aplicação das regras “R2007+”. Entretanto, de acordo com a Figura 93, que apresenta os resultados da aplicação do modelo desenvolvido com os caudais reais (integrados como se fossem previsões “perfeitas”) observa-se que o caudal máximo afluente a Coimbra no período simulado não ultrapassou os $800 \text{ m}^3/\text{s}$ – que corresponde ao primeiro limiar de inundação definido e que afeta essencialmente as zonas de lazer localizadas na margem do rio Mondego em Coimbra – cumprindo assim os objetivos definidos para o modelo de gestão. Tal como foi constatado com a análise realizada para a cheia de 2001, também desta comparação se pode concluir que o desempenho do modelo está diretamente relacionada com a qualidade das previsões das afluições que tem por base, e que, neste caso, os caudais de cheia ocorridos nas várias sub-bacias não foram previstos com o rigor e a antecedência mais adequados. Não obstante, e observando ainda a Figura 92, a diminuição do nível de água nas duas albufeiras iniciada no dia 08/01/2016 (correspondente à abcissa 144 dos gráficos apresentados) evidencia que a ocorrência do evento de cheia foi prevista com pelo menos dois dias de antecedência, pelas previsões das afluições consideradas.

Também na análise desta situação de cheia, outro facto que é perceptível, tanto nos resultados apresentados na Figura 92 como na Figura 93, é o estabelecimento pelo modelo de um valor superior dos NME – face aos definidos nas regras de exploração em vigor – das duas albufeiras nos primeiros dias do período de simulação e a diminuição desses níveis apenas nos dias anteriores à ocorrência da cheia, de modo a aumentar o volume de encaixe necessário ao amortecimento dos caudais afluentes previstos. Mais uma vez aqui se constata que, com este procedimento, o modelo permite manter níveis de água elevados nas albufeiras durante os períodos em que não há previsões de afluição significativas, o que é potencialmente benéfico para as restantes utilizações do sistema de albufeiras.

Em contrapartida, as regras incluídas no modelo permitem que as albufeiras atinjam níveis de água máximos superiores aos definidos nas regras atualmente estabelecidas, embora essas diferenças sejam pequenas relativamente às regras “R2007+”. Dessa forma, e como anteriormente referido, a aplicação

do modelo e dos procedimentos adicionais definidos pode aumentar ligeiramente a vulnerabilidade das barragens ao galgamento durante uma situação de cheia, mas o efeito benéfico da utilização das previsões na gestão operacional das albufeiras nessas situações, através da frequente atualização das mesmas, reduz a probabilidade de uma eventual ocorrência, face à não consideração das previsões.

6.3.3.3. Análise geral dos resultados

No Quadro 23 apresenta-se o resumo dos resultados da exploração das albufeiras da Aguieira e de Fronhas obtidos para todos os períodos simulados, com aplicação comparativa dos dois conjuntos de regras de exploração atualmente estabelecidos pela EDP (“R2007” e “R2007+”) com o modelo desenvolvido nesta tese, conforme definido em 6.3.1. Recorda-se que, para os períodos de cheia de janeiro de 2001 e janeiro de 2016, o modelo desenvolvido foi aplicado com as previsões das afluições (Prev) e com as correspondentes afluições observadas (Obs). Os resultados correspondentes a esses dois períodos e ao período de fevereiro de 2014 foram apresentados nas subsecções anteriores (6.3.3.2 e 6.3.3.1, respetivamente) e os restantes são expostos no Anexo 5.

O resumo dos resultados aqui apresentado é constituído pelos indicadores de desempenho definidos em 3.6.2, ou seja:

- i) os níveis médios de água nas albufeiras, que se pretende que sejam mantidos tão elevados quanto possível, sem comprometer as condições de segurança das estruturas hidráulicas;
- ii) o número de horas em que o caudal afluyente a Coimbra é maior do que os valores máximos estabelecidos, que neste caso se consideraram ser de 800, 900, 1000 e 1200 m³/s, pretendendo-se que esses espaços temporais sejam também tão reduzidos quanto possível para evitar ou minimizar as limitações causadas pelas inundações correspondentes e os impactos associados;
- iii) o caudal máximo afluyente a Coimbra, que se pretende que, numa situação de cheia, seja o mais reduzido possível, para evitar ou minimizar os impactos em Coimbra e no vale a jusante.

Conforme referido anteriormente em 3.6.2 e em 6.3.1, uma vez que as regras de exploração utilizadas para comparação com o modelo desenvolvido no âmbito desta tese não integram uma componente de previsão de afluições, a avaliação do desempenho do modelo expressa o valor acrescentado efetivo que é aportado pela incorporação das previsões. Isto é, sendo o valor das previsões definido como o grau de utilidade das previsões em termos económicos ou de outros benefícios mensuráveis (ver 2.4.2), os indicadores de desempenho do modelo definidos podem ser considerados indicadores do valor das previsões hidrológicas obtidas nesta tese.

Quadro 23. Indicadores de desempenho obtidos para a exploração das albufeiras da Aguieira e de Fronhas, para os vários períodos de cheia considerados, com a aplicação das regras de exploração pré-definidas – “R2007” e “R2007+” – e com a utilização do modelo desenvolvido nesta tese, com os dados previstos (Prev) e com os dados observados (Obs).

Evento de cheia	Regras de exploração	Nível médio da água na albufeira (m)		Número de horas com caudal afluyente a Coimbra a ultrapassar os valores de (m³/s):				Caudal máximo afluyente a Coimbra (m³/s)
		Aguieira	Fronhas	800	900	1000	1200	
Janeiro de 2001	R2007	119,44	127,72	93	93	78	45	2222
	R2007+	118,99	127,13	105	105	78	54	1817
	Modelo (Prev)	123,18	128,56	108	99	69	51	2030
	Modelo (Obs)	120,79	124,48	114	69	45	27	1304
Janeiro de 2013	R2007	119,77	128,47	33	18	0	0	967
	R2007+	118,29	125,56	63	18	0	0	958
	Modelo (Prev)	122,27	127,56	0	0	0	0	800
Março de 2013	R2007	118,56	130,16	117	54	18	0	1091
	R2007+	117,44	126,34	120	54	3	0	1012
	Modelo (Prev)	121,95	131,21	24	24	0	0	1000
Janeiro de 2014	R2007	118,83	129,96	84	42	27	0	1132
	R2007+	118,07	125,66	84	42	21	0	1129
	Modelo (Prev)	121,88	126,48	24	0	0	0	900
Fevereiro de 2014	R2007	119,66	130,38	201	159	36	18	1412
	R2007+	119,40	127,47	234	129	36	3	1206
	Modelo (Prev)	121,24	124,82	192	168	0	0	1000
Janeiro de 2016	R2007	119,37	125,38	27	18	9	6	1408
	R2007+	118,30	125,48	54	27	3	0	1001
	Modelo (Prev)	122,83	126,23	45	45	6	0	1165
	Modelo (Obs)	121,67	124,41	0	0	0	0	800

Atentos os resultados apresentados no Quadro 23, sublinha-se em primeiro lugar que, para os seis eventos de cheia analisados, os maiores níveis médios de água na albufeira da Aguieira – que é a maior albufeira do sistema, e na qual a diferença nos níveis de água tem um maior significado em termos de volumes armazenados – foram obtidos com a aplicação do modelo de gestão de albufeiras desenvolvido, incorporando as previsões obtidas nesta tese. Em relação aos níveis médios de água na albufeira de Fronhas, em três dos períodos analisados (janeiro de 2001, março de 2013 e janeiro de 2016) foi observada a mesma situação, e nos restantes três períodos, os valores superiores foram obtidos com a aplicação das regras de exploração “R2007”, cujo procedimento associado implica que, em situação de cheia, o nível da água se mantenha próximo da cota 130,50 m, apenas com pequenas oscilações em torno desse valor.

Em relação ao segundo indicador, de acordo com os resultados sintetizados no Quadro 23, observa-se que, em todos os períodos de cheia analisados, com a aplicação do modelo desenvolvido nesta tese, o número de horas em que o caudal afluente ultrapassou os 1000 m³/s e os 1200 m³/s foi igual ou inferior ao resultante da aplicação das outras regras de exploração analisadas. De um modo geral, o mesmo pode ser inferido em relação ao número de horas em que o caudal afluente a Coimbra ultrapassou os limiares de cheia mais reduzidos – 800 m³/s e 900 m³/s – salvo duas exceções, correspondentes aos períodos de janeiro de 2001 e de fevereiro de 2014, em que, no primeiro caso a aplicação das regras “R2007” produziu um menor tempo de inundação, com caudais acima do primeiro limiar estabelecido, e no segundo caso, as regras “R2007+” apresentaram o menor tempo de superação do segundo limiar.

Quanto aos resultados do caudal máximo afluente a Coimbra, como se pode observar também no Quadro 23, a aplicação do modelo de gestão de albufeiras apresentou os menores valores para todos os períodos de cheia analisados. Nos períodos relativos aos eventos de cheia ocorridos em janeiro e março de 2013 e em janeiro e fevereiro de 2014 – cheias “intermédias” – é notório que a utilização do modelo com as previsões de afluências consideradas teria sido significativamente mais vantajosa do que a aplicação das regras atualmente estabelecidas, minimizando, quer o caudal máximo afluente a Coimbra, quer o número de horas de inundação. Por outro lado, e como já descrito em 6.3.3.2, para os períodos de cheia de janeiro de 2001 e de janeiro de 2016 – que foram eventos de maior magnitude em termos de caudal de ponta de cheia registado em Coimbra, e que tiveram, consequentemente, impactos mais graves – os melhores resultados dos indicadores avaliados foram obtidos com a aplicação do modelo de gestão baseado nas afluências reais, refletindo a menor qualidade das previsões utilizadas para estes casos. Donde se pode concluir que o modelo desenvolvido representa um avanço na otimização da exploração das albufeiras para os objetivos definidos, avanço esse que está porém condicionado pela qualidade das previsões das afluências, que, por sua vez, está diretamente ligada à qualidade das previsões de precipitação realizadas pelo ECMWF. Acresce ainda que, tal como se verificou na análise das situações de cheia de janeiro de 2001 e de janeiro de 2016, apresentada em 6.3.3.2, apesar de nem sempre preverem a magnitude dos eventos de cheia, as previsões das afluências realizadas e aplicadas nesta tese mostraram capacidade para preverem a ocorrência dos eventos considerados com alguns dias de antecedência, o que é também uma informação de especial importância para a gestão do sistema de albufeiras tendo em vista a sua exploração ótima.

Tendo em consideração os três indicadores apresentados no Quadro 23 para os seis eventos de cheia analisados, observa-se que, de uma forma geral, o modelo de gestão desenvolvido e proposto neste trabalho seria o mais adequado para a gestão operacional das albufeiras nas várias situações de cheia consideradas, que apresentam magnitudes bastante díspares. Conforme anteriormente referido, desta avaliação conclui-se que a incorporação de previsões de afluências na gestão operacional das albufeiras representa um valor acrescentado efetivo face à sua não consideração.

Daqui se conclui também que as previsões obtidas nesta tese são uma mais-valia para a gestão das albufeiras da Aguieira e de Fronhas e para as localidades a jusante, uma vez que se mostrou que, na maioria dos casos testados, os três indicadores associados aos resultados da aplicação do modelo com as previsões de afluências produziram melhores resultados do que com a aplicação das outras regras.

Por último, graças à capacidade de amortecimento de caudais de cheia, este modelo permite manter níveis elevados de água nas albufeiras durante os períodos em que não há previsões de afluência significativas, o que é de todo benéfico para as outras utilizações, em especial para a produção hidroelétrica, que assume maior relevância na albufeira da Aguieira.

Em síntese, tendo em vista os objetivos inicialmente definidos, quer de maior antecedência no conhecimento de eventos de cheia para amortecer os caudais de cheia e assim evitar ou minimizar as cheias fluviais em Coimbra e no vale a jusante, quer de maior elevação dos níveis médios de água nas albufeiras para satisfazer as várias utilizações do sistema, o modelo desenvolvido nesta tese representa um progresso para a previsão e alerta de cheias na bacia, e para o acionamento de ações de resposta a essas situações, através da gestão operacional das suas albufeiras.

6.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo descreveu-se o modelo desenvolvido para a gestão operacional das albufeiras da Aguieira e de Fronhas em situações de cheia, tendo em seguida sido apresentados os resultados desse modelo obtidos para vários períodos de cheia, com magnitudes e variações espaciais e temporais diferentes, os quais evidenciaram que o modelo apresenta um bom desempenho na otimização da exploração das albufeiras em situações de cheia, quando comparado com as regras de exploração definidas.

Por outro lado, para salvaguardar os casos em que as previsões das afluências falhem e não detetem a ocorrência dos eventos de cheia ou não estimem adequadamente a magnitude dos mesmos com a antecedência suficiente ao seu adequado amortecimento, o modelo integra regras adicionais para não comprometer a segurança das estruturas.

Além disso, como o modelo é atualizado diariamente e as previsões das afluências são ajustadas aos caudais afluentes às albufeiras registados no início de cada dia, a exploração pode ser ajustada diariamente, melhorando dessa forma o seu desempenho nos dias seguintes. Numa aplicação real, e especificamente em situações de cheia, o intervalo de produção das previsões hidrológicas e de execução do modelo de gestão operacional pode ser reduzido de 24 para 12 horas, uma vez que o ECMWF produz novas previsões às 00h e às 12 horas, melhorando assim a antecedência e a fiabilidade da previsão.

Além disso, e apesar de não ser um objetivo específico da tese, refere-se que o modelo de gestão foi desenvolvido para poder ser aplicado também na gestão das albufeiras em situações correntes, em que não há previsão de situações de cheia, permitindo, através da previsão das afluências, simular a gestão dos órgãos de descarga de modo a restabelecer os níveis de água pré-estabelecidos nas albufeiras.

7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA O FUTURO

No primeiro capítulo foi desde logo definido o objetivo geral da tese, que consiste no desenvolvimento e aplicação de uma metodologia de previsão e alerta de cheias para bacias hidrográficas, tendo em conta o seu grau de regularização, que possa ser aplicada de forma contínua no tempo e que permita prever a ocorrência de cheias com fiabilidade e antecedência suficientes para que, em tempo oportuno, se possam criar volumes de encaixe nas albufeiras adequados para amortecer os efeitos desses eventos. Estabelecido este propósito, e atenta a revisão bibliográfica conduzida – essencial ao conhecimento do estado da arte sobre o tema proposto – bem como a aplicação da metodologia proposta ao caso de estudo escolhido, expõem-se aqui as principais conclusões da dissertação.

De acordo com o conhecimento adquirido na elaboração do estado da arte, um sistema de previsão e alerta de cheias deverá englobar uma componente de previsão meteorológica e uma componente de previsão hidrológica. Dessa forma, a metodologia desenvolvida possui também uma componente correspondente a cada um desses tipos de previsão.

Dada a área científica em que se insere a tese, não fez parte dos objetivos da dissertação a previsão de dados meteorológicos. Contudo, foi necessário obter e tratar esses dados para que, com a aplicação do modelo de simulação hidrológica devidamente parametrizado, fosse possível realizar previsões do escoamento em vários pontos da rede hidrográfica.

O objetivo do modelo hidrológico desenvolvido – utilizando o programa HEC-HMS – consistiu na realização de simulações diárias para a previsão do escoamento num horizonte temporal de 10 dias, nomeadamente quando o escoamento previsto atinge valores associados a situações de cheia. Uma vez que os parâmetros de calibração não podem ser estáticos, foi desenvolvido um processo de calibração contínuo, o qual assumiu um papel fulcral na dissertação. O resultado desse processo consistiu na definição de valores para os parâmetros de calibração do modelo em função de variáveis hidrometeorológicas que representam o estado hidrológico da bacia no momento da simulação e no futuro próximo (a curto prazo), nomeadamente volumes de escoamento e de precipitação registados anteriormente à data da previsão, e volumes de precipitação previstos para os dias seguintes. Assim, foi proposta e validada uma metodologia de calibração para uso em previsão operacional de cheias com o modelo HEC-HMS. A aplicação da metodologia para as sub-bacias da Aguieira e de Fronhas,

que representam 75% da bacia hidrográfica a montante de Coimbra, conduziu à seleção das seguintes variáveis para essa calibração: i) o volume de escoamento nos cinco dias anteriores à realização da previsão e a precipitação total dos três dias seguintes – para ajustar o parâmetro CN que caracteriza o modelo precipitação-escoamento – e, ii) a precipitação total que ocorreu nos dois meses anteriores à previsão – para ajustar o parâmetro R, característico do modelo do escoamento de base.

Executando o modelo hidrológico, desenvolvido para a bacia hidrográfica do rio Mondego, com os dados de previsão de precipitação por *ensemble* provenientes do modelo global de previsão do ECMWF – integrando 51 previsões ou membros do ENS e a previsão determinística do HRES – obtiveram-se as previsões de caudais por *ensemble* afluentes, em regime natural, às várias secções de escoamento definidas nesse modelo.

Para análise e verificação dos resultados das simulações realizadas – que é essencial para perceber qual é o grau de confiança que se pode esperar das previsões correspondentes – foram aplicados vários métodos estatísticos para avaliação da consistência e da qualidade das previsões hidrológicas obtidas para um período de quatro anos, compreendido entre 01/03/2010 e 28/02/2011, nas duas secções do modelo em que estão disponíveis dados de caudais observados para comparação com as previsões realizadas, ou seja, nas secções correspondentes às albufeiras da Aguieira e de Fronhas. Atendendo às conclusões inferidas através da análise dos resultados de cada um dos métodos estatísticos aplicados, e à ausência de critérios de referência que permitam, de forma sistemática, classificar a qualidade das previsões em função dos resultados desses métodos, conclui-se que as previsões de caudais por *ensemble* produzidas no âmbito desta tese apresentam, em geral, boa qualidade para detetar a ocorrência de caudais acima dos limiares estabelecidos, especialmente quando são considerados os percentis mais elevados das previsões por *ensemble*.

Dada a dispersão e a incerteza existentes nas previsões por *ensemble*, a avaliação das previsões realizada teve também como objetivo selecionar uma previsão de referência para a tomada de decisões operacionais na gestão de albufeiras e na adoção de medidas de controlo e proteção contra cheias, na qual se definiu que deveria ser composta pelo valor máximo do *ensemble* nas primeiras 72 horas, e pelo percentil 75 do *ensemble* das 72 às 240h.

Além das componentes de previsão meteorológica e hidrológica, a metodologia engloba também uma componente de otimização da gestão operacional de albufeiras para situações de cheias, que permite analisar quais os efeitos das operações de descarga a jusante das albufeiras, em termos de caudais afluentes, e permite também prever quando e quais os volumes que é necessário descarregar para atenuar o efeito das cheias nos locais previamente identificados.

A aplicação desta análise ao caso de estudo resultou numa proposta de regras de gestão para o sistema de albufeiras Aguieira-Raiva-Fronhas, a qual, com base em previsões de caudais num horizonte temporal de 10 dias, permite determinar o caudal a descarregar nas próximas 24 horas por cada uma das albufeiras do sistema de modo a: i) evitar ou minimizar as cheias fluviais em Coimbra e no vale a jusante; e ii) manter os níveis das albufeiras de Fronhas e da Aguieira o mais elevados possível, sem comprometer as condições de segurança das suas estruturas (barragem e órgãos de descarga).

Tendo em consideração os resultados finais obtidos para seis eventos de cheia analisados, conclui-se que o modelo de gestão operacional de albufeiras desenvolvido e proposto neste trabalho é adequado a várias situações de cheia, com magnitudes bastante díspares. Da avaliação do desempenho desse modelo, realizada através da análise dos seus resultados e da comparação destes com os resultados da aplicação das regras de exploração atualmente existentes – que não integram uma componente de previsão de aflúências – concluiu-se que a incorporação de previsões de aflúências representa um valor acrescentado efetivo na gestão operacional das albufeiras, em relação à sua não consideração.

Paralelamente com o amortecimento de caudais de cheia, este modelo permite manter níveis elevados de água nas albufeiras durante os períodos em que não há previsões de aflúência significativas, o que é benéfico para as outras utilizações, em especial para a produção energética.

A metodologia de previsão e alerta de cheias que foi desenvolvida tem por base a aplicação realizada para a bacia do rio Mondego, que, como referido, constituiu o caso de estudo desta tese. No entanto, esta metodologia pode ser aplicada, com as devidas adequações, a qualquer outra bacia hidrográfica regularizada. O resultado final da tese constitui, assim, um guião para o desenvolvimento de sistemas de previsão e alerta de cheias para aplicação a bacias regularizadas.

A aplicação da metodologia desenvolvida e proposta nesta tese representa um progresso – em relação ao quadro atualmente existente a nível nacional – para a previsão e alerta de cheias em bacias regularizadas, e para o acionamento de ações de resposta a essas situações, através da gestão operacional das suas albufeiras.

Face ao trabalho apresentado na presente dissertação, deve ser salientada a relevância de alguns potenciais desenvolvimentos futuros que poderão proporcionar uma melhoria na metodologia e na aplicação aqui apresentada.

De facto, a maior dificuldade verificada e, provavelmente, aquele que foi o principal limitador da qualidade dos resultados obtidos, foi a quantidade e qualidade dos dados de base existentes. Por esse motivo, considera-se como uma melhoria fundamental a monitorização contínua e fiável da precipitação e do escoamento superficial em múltiplos pontos da bacia, que permitirá aumentar a discretização do modelo hidrológico através da subdivisão deste num maior número de sub-bacias, onde a calibração poderá ser realizada.

Não obstante, além de desenvolvimentos pontuais que poderão permitir resultados parcelares mais rigorosos e fidedignos, uma abordagem que poderá causar uma eventual melhoria dos resultados finais obtidos será a utilização de um modelo de simulação hidrológica conceptualmente mais complexo e espacialmente mais distribuído, considerando um esquema de simulação contínua que considere a inter-relação entre todos os processos hidrológicos que ocorrem ao nível da bacia.

Por fim, como potencial desenvolvimento futuro do trabalho agora apresentado, sugere-se, ainda:

- a aplicação desta metodologia incorporando, adicionalmente, dados de previsão meteorológica por *ensemble* provenientes de outros centros, nomeadamente obtidos através de modelos regionais;

- o desenvolvimento de um modelo hidráulico que permita prever as potenciais áreas inundáveis e mapear o risco de inundação, para o caudal de cheia previsto;
- o desenvolvimento de uma ferramenta de interface que estabeleça a ligação entre as várias componentes desenvolvidas e, potencialmente também, com o modelo de risco de inundação, corporizando um sistema completo de previsão e alerta de cheias para bacias regularizadas;
- a aplicação da metodologia proposta a outras regiões de estudo, no País ou no estrangeiro.

BIBLIOGRAFIA

- Abbaspour, K. (2005). *Calibration of Hydrologic Models: When is a Model Calibrated?* Em: Zerger, A. and Argent, RM (eds.) MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, pp 2249-2455, ISBN: 0-9758400-2-9.
- ACTIF (2015). Sítio da Internet do Projeto: “*Achieving Technological Innovation in Flood Forecasting*”. Disponível online em (<http://www.actif-ec.net/>), consultado em dezembro de 2015.
- Ahmad, A., El-Shafie, A., Razali, S., Mohamad, Z. (2014). *Reservoir Optimization in Water Resources: a Review*. Water Resources Management, 28(11), pp 3391-3405, doi:10.1007/s11269-014-0700-5.
- Ahmad, S., Simonovic, S. (2000). *System dynamics modeling of reservoir operations for flood management*. Journal of Computing in Civil Engineering, 14 (3), pp 190-198.
- Ahmed, E. Mays, L. (2013). *Model for determining real-time optimal dam releases during flooding conditions*. Natural hazards, 65, pp 1849-1861.
- Ahrens, C. (2005). *Weather Forecasting. In Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere*, pp 231-255, International Student Edition, 4ª edição, ISBN: 0-534-40679-3.
- Alfieri, L., Burek, P., Dutra, E., Krzeminski, B., Muraro, D., Thielen, J., Pappenberger, F. (2013) *GloFAS – global ensemble streamflow forecasting and flood early warning*, Hydrololy and Earth System Science, 17, pp 1161-1175, doi:10.5194/hess-17-1161-2013.
- Alfieri, L., Pappenberger, F., Wetterhall, F., Haiden, T., Richardson, D., Salamon, P. (2014). *Evaluation of ensemble streamflow predictions in Europe*. Journal of Hydrology, 517 (19), pp 913-922, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.06.035.
- Anderson, M., Chen, Z., Kavvas, M., Feldman, A. (2002). *Coupling HEC-HMS with Atmospheric Models for Prediction of Watershed Runoff*. Journal of Hydrologic Engineering, 7(4), pp 312–318, doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(312).
- Andrade, M., Mello, C. and Beskow, S., (2013). *Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 17(1), pp 69-76. Disponível online em (<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v17n1/v17n01a10.pdf>), consultado em outubro 2015.
- APA (2014). *Elaboração de Cartografia Específica sobre Risco de Inundação para Portugal Continental*. Relatório Final, Volume 1 – Memória Descritiva. Disponível online em: (<http://snirh.pt/index.php?idMain=2&idItem=5.4>), consultado em setembro de 2015.
- APA (2015). *Plano de Gestão dos Riscos de Inundações*. Região Hidrográfica 4 - Vouga, Mondego e Lis. Dezembro de 2015. Disponível online em: (http://www.apambiente.pt/zdata/Políticas/Agua/PlaneamentoGestao/PGRI/PGRI_ParticipaoPublica/PGRI_RH4A.pdf), consultado em janeiro de 2016.

- ARH-Centro (2011a). *Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis integradas na Região Hidrográfica 4*. Relatório Técnico para efeitos de Participação Pública, Administração da Região Hidrográfica do Centro.
- ARH-Centro (2011b). *Apresentação W6 - Energia e Aproveitamentos Hidráulicos*. Workshop "Cenários prospectivos dos sectores com impacto sobre os recursos hídricos", 13 de junho de 2011, Coimbra.
- ARH-Centro (2012). *Sessão W3 - Energia e Aproveitamentos Hidráulicos - Apresentação do Programa de Medidas*. Consulta Pública do Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis, 23 de fevereiro de 2012, Coimbra.
- ARH-Norte (2011). *Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça (RH2)*. Relatório Técnico. Versão para consulta pública, Administração da Região Hidrográfica do Norte.
- Ashton, V., Aziz, H., Keith, S., Smith, T. (2003). *Review of EU Flood R&D Projects*. Report prepared as a part of the Group Management Project on the M.Sc. Water Resources Technology and Management Course, University of Birmingham and HR Wallingford. Disponível online em: (http://www.actif-ec.net/library/review_EU_flood_projects.pdf), consultado em janeiro de 2014.
- Bao, H., Zhao, L., He, Y., Li, Z., Wetterhall, F., Cloke H., Pappenberger, F., Manful, D. (2011). *Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinjiang model for flood forecast*. Advances in Geosciences, 29, pp 61–67, doi:10.5194/adgeo-29-61-2011.
- Bartholmes, J., Thielen, J., Ramos, M., Gentilini, S. (2009). *The european flood alert system EFAS – Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts*, Hydrology and Earth System Sciences, 13, pp141-153, doi:10.5194/hess-13-141-2009.
- Beckers, J., Smerdon, B., Wilson, M. (2009). *Review of Hydrologic Models for Forest Management and Climate Change Applications in British Columbia and Alberta*. Em: Forrex series, 25, Forrex - Forum for Research and Extension in Natural Resources, Kamloops, ISSN 1495-9658. Disponível online em: (http://www.forrex.org/sites/default/files/forrex_series/FS25.pdf), consultado em dezembro 2011.
- Bougeault, P., Toth, Z., Bishop, C., Brown, B., D. Burridge, D. Chen, E. Ebert, M. Fuentes, T. Hamill, K. Mylne, J. Nicolau, T. Paccagnella, Y.-Y. Park, D. Parsons, B. Raoult, D. Schuster, P. Silva Dias, R. Swinbank, Y. Takeuchi, W. Tennant, L. Wilson, Worley, S. (2010). *The THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE)*. Bulletin of the American Meteorological Society, 91, pp 1059–1072, doi:10.1175/2010BAMS2853.1.
- Boyle, D., Gupta, H., Sorooshian, S. (2000). *Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods*. Water Resources Research, 36 (12), pp 3663-3674, doi:10.1029/2000WR900207.
- Bradley, A., Hashino, T., Schwartz S. (2003). *Distributions-oriented verification of probability forecasts for small data samples*. Weather Forecasting, 18, pp 903–917.

- Bradley, A., Hashino, T., Schwartz S. (2004). *Distributions-oriented verification of ensemble streamflow predictions*. Journal of Hydrometeorology, 5, pp 532–545.
- Brandão, C. (2008). *Diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho Relativa à Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundações*. FunDEC, 27 de março de 2008, Lisboa. Disponível online em (http://snirh.pt/snirh/download/relatorios/IST_INUNDACOES_27_03_2008_CBrandao.pdf), consultado em março 2011.
- Brandão, C., Rodrigues, R. (1998). *Modelação hidrológica de cheias afluentes a barragens como mecanismo de auxílio à gestão de albufeiras*. 4º Congresso da Água, 23 a 27 de março de 1998, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa. Disponível online em (<http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/044.pdf>), consultado em março 2011.
- Bravo, J., Collischonn, W., Tucci, C., Pilar, J., Silva., B. (2008). *Avaliação dos Benefícios de Previsões de Vazão na Operação de Reservatórios*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 13(1), pp 197-213.
- Brown, J., Demargne, J., Seo, D-J., Liu, Y. (2010). *The Ensemble Verification System (EVS): a software tool for verifying ensemble forecasts of hydrometeorological and hydrologic variables at discrete locations*. Environmental Modelling and Software, 25(7), pp 854-872.
- CAWCR (2015). *WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research*. Centre for Australian Weather and Climate Research. Disponível online em: (<http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/>), consultado em setembro 2015.
- CE (2004). *Cheias. Uma solução à prova de água. A investigação europeia em acção - Cheias*. Publicação da Comissão Europeia, Direcção-Geral da Investigação, junho de 2004.
- CE (2007). *Diretiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro de 2007 relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações*. Jornal Oficial da União Europeia de 6 de Novembro de 2007, L288, pp 27-34.
- CE (2015a). *Sítio da Internet da "European Commission: CORDIS - Community Research and Development Information Service": Projects and Results*. Disponível online em (http://cordis.europa.eu/home_en.html), consultado em dezembro de 2015.
- CE (2015b). *Sítio da Internet da "European Commission: Horizon 2020 - The EU Framework Programme for Research and Innovation": Faster, more accurate flood warnings through EU research*. Disponível online em: (<http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/faster-more-accurate-flood-warnings-through-eu-research>), consultado em dezembro de 2015.
- Chang, J., Bai, T., Huang, Q., Yang, D. (2013). *Optimization of water resources utilization by PSO-GA*. Water resources management, 27, pp 3525-3540.
- CHD (2009). *Sítio da Internet da "Confederación Hidrográfica del Duero": Sistema Automático de Información Hidrológica (S.A.I.H.)*. Disponível online em: (<http://www.chduero.es/Inicio/ElaguaenlacuencaCantidad/Implantaci%C3%B3ndeISAIH/tabid/290/Default.aspx>), consultado entre agosto 2009 e dezembro 2011.

- CHMS (2014). *Proyecto de plan hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Miño - Sil 2015-2021. Capítulo 11 - Planes dependientes: sequías e inundaciones*. Confederación Hidrográfica del Miño-Sil. Disponível online em (<http://www.chminosil.es/images/planificacion/proyecto-ph-2015-2021/11.-CAPITULO-XI.pdf>), consultado em novembro de 2015.
- Chu, X., Steinman, A. (2009). *Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering - ASCE, 135(1), pp: 119–124. , doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2009)135:1(119).
- Cloke, H., Pappenberger, F. (2009). *Ensemble flood forecasting: A review*. Journal of Hydrology, 375, pp 613-626, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.06.005.
- CNPGB (2012). *Sítio da Internet da "Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens": Barragens de Portugal*. Disponível online em (http://cnpgb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/Lista.htm), consultado em maio 2012.
- Cortes, V., Frigerio, S., Schenato, L., Pasuto, A., Sterlacchini, S. (2013). *Review of the current risk management strategies in Europe for hydro-meteorological hazards at protection and emergency level*. Em: Comprehensive Flood Risk Management – Klijn & Schweckendiek (eds), Taylor & Francis Group, London, ISBN: 978-0-415-62144-1.
- Coulibaly, P., Dibike, Y., Anctil, F. (2005). *Downscaling precipitation and temperature with temporal neural networks*. Journal of Hydrometeorology, American Meteorological Society, 6, pp 483-496.
- Coustau, M., Rousset-Regimbeau, F., Thirel, G., Habets, F., Janet, B., Martin, E., Saint-Aubin, C., Soubeyroux, J. (2015). *Impact of improved meteorological forcing, profile of soil hydraulic conductivity and data assimilation on an operational Hydrological Ensemble Forecast System over France*. Journal of Hydrology, 525, pp 781-792, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.04.022.
- Cranston, M., Werner, M., Janssen, A., Hollebrandse, F., Lardet, P., Oxbrow, J., Piedra, M. (2007). *Flood Early Warning System (FEWS) Scotland: An example of real time system and forecasting model development and delivery best practice*. DEFRA Conference on Flood and Coastal Management, 3 a 5 de julho de 2007, York.
- CRED (2015). *The International Disaster Database (EM-DAT)*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. Disponível online em (<http://www.emdat.be/database>), consultado em junho 2015.
- Cunderlik, J., Simonovic, S. (2004). *Calibration, Verification and Sensitivity Analysis of the HEC-HMS Hydrologic Model*. Water Resources Research Report, Report No. 048, ISSN:1913-3219.
- Cuo, L., Pagano, T., Wang, Q. (2011). *Review of Quantitative Precipitation Forecasts and Their Use in Short- to Medium-Range Streamflow Forecasting*. Journal of Hydrometeorology, 12, pp 713–728, doi:10.1175/2011JHM1347.1.

- Datorani, M., Khodaparast, R., Talebi, A., Vafakhah, M., Dashti, J. (2011). *Determination of the Ability of HEC-HMS Model Components in Rainfall-runoff Simulation*. Research Journal of Environmental Sciences, 5(10), pp 790-797, doi:10.3923/rjes.2011.790.797.
- Deltares (2010). *Software Delft-FEWS*. Disponível online em (http://oss.deltares.nl/c/document_library/get_file?uuid=bf86fd5e-50d5-4188-832c-3d46b5ae61a5&groupId=145641), consultado em janeiro 2012.
- Deltares (2015). *Sítio da Internet do "Delft-FEWS Software Community"*. Disponível online em: (<https://oss.deltares.nl/web/delft-fews/>), consultado em dezembro de 2015.
- Demargne J., Brown, J., Liu, Y., Seo, D., Wu, L., Toth, Z., Zhu, Y. (2010). *Diagnostic verification of hydrometeorological and hydrologic ensembles*. Atmospheric Science Letters, 11 (2), pp 114-122.
- Demargne, J., Brown, J. (2013). *HEPEX Science and Challenges: Verification of Ensemble Forecasts. HEPEX*. Disponível online em: (<http://hepex.irstea.fr/hepex-science-and-challenges-verification-of-ensemble-forecasts/>), consultado em setembro 2015.
- Demargne, J., Mullusky, M., Werner, K., Adams, T., Lindsey, S., Schwein, N., Marosi, W., Welles, E. (2009). *Application of Forecast Verification Science to Operational River Forecasting in the U.S. National Weather Service*. Bulletin of the American Meteorological Society, 90, pp 779–784.
- Demargne, J., Wu, L., Regonda, S., Brown, J., Lee, H., He, M., Seo, D., Hartman, R., Herr, H., Fresch, M., Schaake, J., Zhu, Y. (2014). *The science of NOAA's operational hydrologic ensemble forecast service*. Bulletin of American Meteorology Society, 95, pp 79–98.
- Dingman, S. (2002). *Physical Hydrology*. Waveland Press, Long Grove (EUA).
- Doherty, J., Johnston, J. (2003). *Methodologies for calibration and predictive analysis of a watershed model*. Journal of the American Water Resources, 39 (2), pp 251-265, doi:10.1111/j.1752-1688.2003.tb04381.x.
- DR (2010). Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de outubro, Diário da República, 1.ª série, N.º 206, 22 de outubro de 2010, pp 4757-4764.
- ECMWF (2008). *IFS Documentation - Cy33r1*. Operational implementation 3 June 2008. Part V: Ensemble Prediction System, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading. Disponível online em (<http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY33r1/ENSEMBLE/IFSPart5.pdf>), consultado em maio 2011.
- ECMWF (2015a). *Changes in ECMWF model*. Disponível online em (<http://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/changes-ecmwf-model>), consultado em novembro 2015.
- ECMWF (2015b). *Documentation and support*. Disponível online em (<http://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support>), consultado em novembro 2015.
- ECMWF (2015c). *User guide to ECMWF forecast product*. Disponível online em (http://www.ecmwf.int/sites/default/files/User_Guide_V1.2_20151123.pdf), consultado em novembro 2015.

- EDP (2003). *Barragem da Aguieira. Revisão do Estudo das Cheias e Análise da Adequação dos Órgãos de Descarga*. Relatório técnico, refª 026-P0005/04.
- EDP (2007). *Sistema Aguieira-Raiva-Fronhas. Revisão das Normas de Exploração das Albufeiras e dos Órgãos de Segurança*. Estudos de base. Relatório técnico, refª 2171-P1358/07.
- EDP (2009). *Estudo de Impacte Ambiental do Aproveitamento Hidroelétrico do Alvito*. Volume 1 - Relatório Síntese, Tomo I, setembro de 2009, refª JRB0578.001, EDP - Gestão da Produção de Energia e Atkins. Disponível online em (http://www.edp.pt/pt/sustentabilidade/EDPDocuments/Estudos%20de%20impacte%20ambiental/Volume1-RelSintese_Tomo1.pdf), consultado em maio de 2012.
- EEA (2012). *Sítio da Internet da "European Environment Agency": European Soil Sealing V2*. Disponível Online em: (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/explore-interactive-maps/european-soil-sealing-v2>), consultado em setembro de 2012.
- EFAS (2015). *Sítio da Internet do "European Flood Awareness System (EFAS)"*. Disponível Online em: (www.efas.eu/about-efas.html), consultado em dezembro de 2015.
- Endesa (2010). *Aproveitamento Hidroelétrico de Girabolhos*. Estudo de Impacte Ambiental, Resumo não técnico, Endesa Generación e Endesa Portugal e PROCESL. Disponível online em (http://pnbeiph.inag.pt/np4/np4/?newsId=25&fileName=RNT_Girabolhos.pdf), consultado em maio 2012.
- Faber, B., Stedinger, J. (2001). *Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts*. Journal of Hydrology, 249(1–4), pp 113-133, doi: 10.1016/S0022-1694(01)00419-X.
- Fan, F. (2015). *Previsão por conjunto de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras*. Tese de doutoramento em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Brasil.
- Fan, F., Collischonn, W., Meller, A., Botelho, L. (2014). *Ensemble streamflow forecasting experiments in a tropical basin: The São Francisco river case study*. Journal of Hydrology, 519 (D), pp 2906–2919.
- Fan, F., Schwanenberg, D., Collischonna, W., Weerts A. (2015). *Verification of inflow into hydropower reservoirs using ensemble forecasts of the TIGGE database for large scale basins in Brazil*. Journal of Hydrology: Regional Studies, 4, pp 196–227, doi:10.1016/j.ejrh.2015.05.012.
- Fayaed, S., El-Shafie, A., Jaafar, O. (2013). *Reservoir-system simulation and optimization techniques*. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 27(7), pp 1751-1772, doi:10.1007/s00477-013-0711-4.
- Feldman, A. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Technical Reference Manual*, Hydrologic Engineering Center of U.S. Army Corps of Engineers. Disponível online em (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC->

- HMS Technical%20Reference%20Manual (CPD-74B).pdf), consultado entre fevereiro 2012 e dezembro de 2015.
- Fleming, M. (2010). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Quick Start Guide*. Version 3.5. Hydrologic Engineering Center of U.S. Army Corps of Engineers. Disponível online em (http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_QuickStart_Guide_3.5.pdf), consultado entre fevereiro 2012 e março de 2015.
- Fleming, M., Doan, J. (2013). *HEC-GeoHMS. Geospatial Hydrologic Modeling Extension. User's Manual*. version 10.1. Hydrologic Engineering Center of U.S. Army Corps of Engineers. Disponível online em (http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/documentation/HEC-GeoHMS_Users_Manual_10.1.pdf), consultado em maio 2013.
- Fonseca, A., Ames, D., Yang, P., Botelho, C., Boaventura, R., Vilar, V. (2014). *Watershed model parameter estimation and uncertainty in data-limited environments*. Environmental Modelling and Software, 51, pp 84–93, doi:10.1016/j.envsoft.2013.09.023.
- Foufoula-Georgiou, E., Ebtehaj, A., Zhang, S. and Hou, A. (2014). *Downscaling Satellite Precipitation with Emphasis on Extremes: A Variational ℓ_1 -Norm Regularization in the Derivative Domain*. Surveys in Geophysics, 35 (3), 765-783.
- Garrett, G. (2011). *Understanding Floods: Questions & Answers*. Queensland Floods Science, Engineering and Technology Panel, Queensland Government. Disponível online em (<http://www.chiefscientist.qld.gov.au/publications/assets/floods-fact-sheet.pdf>), consultado em setembro 2011.
- Gijssbers, P., Welles, E., Weerts, A., Werner, M. (2011). *Similarities and difference in hydrologic forecasting approaches between Europe and America*. CSHS Workshop, 6 e 7 de outubro de 2011, Vancouver, Canadian Society for Hydrological Sciences. Disponível online em (http://www.cwra.org/branches/CSHS/PostCSHSWorkshopPresentation2011/PGijssbers_ForecastingDifferencesEurope-America.pdf), consultado em janeiro 2012.
- GLOFAS (2015). *Sítio da Internet do " Global Flood Awareness System (GloFAS)"*. Disponível Online em: (<http://www.globalfloods.eu/>), consultado em dezembro de 2015.
- Gupta, H., Sorooshian, S., Yapo, P. (1998). *Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information*. Water Resources Research, 34(4), pp 751-763, doi:10.1029/97WR03495.
- Gupta, H., Sorooshian, S., Yapo, P. (1999). *Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration*. Journal of Hydrological Engineering 4(2), pp 135-143, doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135).
- Hewitson, B., Crane, R. (1996). *Climate downscaling: techniques and application*. Climate Research, 7, pp 85-95. Disponível online em (<http://www.int-res.com/articles/cr/7/c007p085.pdf>), consultado em abril 2012.

- Hipólito, J., Vaz, A. (2011). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. IST Press, Coleção Ensino da Ciência e Tecnologia, ISBN: 978-972-8469-86-3.
- Hoskins, B., Schopf, G., Navarra, A. (2008). *Modelling the atmospheric, oceanic and coupled system*. Em: A. Troccoli et al. (eds.), *Seasonal Climate: Forecasting and Managing Risk*, NATO Science Series, 82 (6), pp 129-166, doi: 10.1007/978-1-4020-6992-5.
- Ibanez, A., Schwanenberg, D., Marcos, L., Mahamud, M., González, J. (2011). *An Example of Flood Forecasting and Decision-Support System for Water Management in Spain*. 8th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management, 8 a 11 de maio 2011, LNEC, Lisboa.
- IGP (2012). *Sítio da Internet do "Instituto Geográfico Português": Carta Hipsométrica de Portugal à escala 1:600000*. Disponível online em (http://www.igeo.pt/e-IGEO/egeo_downloads.htm), consultado em junho 2012.
- INAG (1999). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Mondego*. Síntese da Análise e Diagnóstico da Situação Actual: Sumário Executivo (Volume I), Instituto da Água, Lisboa.
- INAG (2000). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Cávado*. 1ª Fase - Volumes I, II e III, Instituto da Água, Lisboa.
- INAG (2001a). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Mondego*. Relatório do Plano, Instituto da Água, Lisboa.
- INAG (2001b). *Monitorização de Recursos Hídricos no limiar do séc. XXI*. Direção de Serviços de Recursos Hídricos do Instituto da Água, Lisboa. Disponível online em (http://snirh.pt/snirh/download/relatorios/Livro_REDES_net.pdf), consultado em fevereiro 2011.
- INAG (2012). *Sítio da Internet do "SNIRH JÚNIOR": Rios de Portugal Continental*. Disponível online em (<http://snirh.pt/junior/?menu=2.1&item=6>), consultado em maio 2012.
- IPMA (2015). *Sítio da Internet do "Instituto Português do Mar e da Atmosfera": Enciclopédia ipma.pt*. Disponível online em (<https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/index.html>), consultado julho 2015.
- Jajarmizadeh, M., Harun, S., Salarpour, M. (2012). *A Review on Theoretical Consideration and Types of Models in Hydrology*. *Journal of Environmental Science and Technology*, 5 (5), pp 249-261, doi:10.3923/jest.2012.249.261.
- Jolliffe, I., Stephenson, D. (eds.) (2003). *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. Chichester: John Wiley and Sons, ISBN 978-0-470-66071-3.
- Jonkman, S. (2005). *Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods*. *Natural Hazards*. Volume , 34(2), Issue 2, pp 151-17.
- King, D. (2010). *HEC-DSS Add-In Excel ® Data Exchange for Excel 2007-2010. User's Manual*. Version 3.2.1., Hydrologic Engineering Center of U.S. Army Corps of Engineers. Disponível online em (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-dss/documentation/HEC->

- DSS Excel Data Exchange Add In For Excel 2007-2010 v3.2.1.pdf), consultado em fevereiro 2012.
- Krause, P., Boyle, D., Base, F. (2005). *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*. Advances in Geosciences, 5, pp 89-97, doi:10.5194/adgeo-5-89-2005.
- Kumar, D.N.; Baliarsingh, F.; Raju, K.S. (2010). *Optimal reservoir operation for flood control using folded dynamic programming*. Water Resources Management, 24, pp 1045-1064.
- Lança, R., Rodrigues, A. (2000). *Um modelo distribuído de precipitação/escoamento superficial. Aplicação à Ribeira de Alportel em condições de cheia*. 5º Congresso da Água - A Água e o Desenvolvimento Sustentável: Desafios para o Novo Século, 25 a 29 de setembro de 2000, Lisboa, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos.
- Lee, S., Nam, J., Choi, H., Ha, J., Lee, Y., Kim, Y., Kang, H., Cho, C. (2015). *A study on the predictability of the transition day from the dry to the rainy season over South Korea*. Theoretical and Applied Climatology, pp 1-19, doi:10.1007/s00704-015-1504-0.
- Lencastre, A., Franco, F.M. (2010). *Lições de Hidrologia*. Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 3ª Edição revista - 2ª Reimpressão, ISBN: 978-972-8152-59-0.
- Liu, Y., Weerts, A., Clark, M., Hendricks Franssen, H., Kumar, S., Moradkhani, H., Seo, D., Schwanenberg, D., Smith, P., van Dijk, A., van Velzen, N., He, M., Lee, H., Noh, S., Rakovec, O., Restrepo, P. (2012). *Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities*, Hydrology and Earth System Science, 16, pp 3863-3887, doi:10.5194/hess-16-3863-2012.
- Louvet, S., Sultan, B., Janicot, S., Kamsu-Tamo, P., Ndiaye, O., (2015). *Evaluation of TIGGE precipitation forecasts over West Africa at intraseasonal timescale*. Climate Dynamics, pp 1-17, doi: 10.1007/s00382-015-2820-x.
- Macedo, M., Hipólito, J. (1997). *Aviso de Cheia em Tempo Real Baseado em Tele-Medição e Radar*. 3º SILUSBA, 15 a 19 de abril de 1997, Maputo, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos. Disponível online em (<http://www.civil.ist.utl.pt/~jh/3SILUSBAmilas.pdf>), consultado em novembro 2011.
- Madsen, H. (2003). *Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives*. Advances in Water Resources 26(2), pp 205-216, doi:10.1016/S0309-1708(02)00092-1.
- Maia, R., Ribeiro, A. (1998). *As cheias e a gestão de bacias hidrográficas*. 4º Congresso da Água, 23 a 27 de março de 1998, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa. Disponível online em (<http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/093.pdf>), consultado em outubro 2010.
- Mariano, A. (2006). *Modelação Hidrológica e Hidráulica. Rio Ponsul - Parque Natural do Tejo Internacional*. Maio de 2006, Direcção de Serviços de Recursos Hídricos, Instituto da Água.

- Marques, J., Mendes, P., Santos, F. (2005). *Cheias em Áreas Urbanas: a zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra*. Territorium - Revista da Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, 12, pp 29-53.
- Marques, J., Pina, R. (2013). *Previsão ou Gestão de cheias? Um caso de estudo numa cidade de média dimensão Coimbra*. Seminário "Gestão dos Riscos na Região Centro", 2 e 3 de dezembro de 2013, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro. Disponível online em (http://www.ccdrc.pt/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=2986&Itemid=91), consultado em outubro de 2014.
- Matos, J. (2014). *Hydraulic-hydrologic model for the Zambezi River using satellite data and artificial intelligence techniques*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. L'École Polytechnique Fédérale de Lausanne & Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- Mendes, J., Maia, R. (2010). *Metodologia Prática para delimitação de leitos de cheia em zonas estuarinas*. Exemplo de aplicação ao rio Neiva. 5^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Mendes, J., Maia, R. (2015a). *Hydrologic modelling calibration for operational flood forecasting*. EWRA2015 - 9th World Congress, 10-13 junho 2015, Istambul.
- Mendes, J., Maia, R. (2015b). *Hydrologic modelling calibration for operational flood forecasting*. Submissão realizada em outubro de 2015 ao "Water Resources Management" (artigo em revisão).
- Mendes, J., Maia, R. (2015c). *Spatial Downscaling and Bias-Correction of 3-hourly precipitation forecasts at river basin scale*. Submissão realizada em novembro de 2015 ao "Journal of Hydrologic Engineering" (artigo em revisão).
- Moel, H., Jongman, B., Kreibich, H., Merz, B., Penning-Rowsell, E., Ward, P. (2015). *Flood risk assessments at different spatial scales*. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 20, pp 865–890, doi:10.1007/s11027-015-9654-z.
- Moore, R., Bell, V. (2001). *Comparison of Rainfall-Runoff Models for Flood Forecasting. Part 1: Literature review of models*. R&D Technical Report W241, Environment Agency, Bristol. Disponível online em (http://nora.nerc.ac.uk/7471/2/Comparison_of_Rainfall-Runoff_Models_for_Flood_Forecasting_Part_1N007471CR.pdf), consultado em janeiro 2012.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R. and Veith, T., (2007). *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*. Transactions of the ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50(3), pp 885-900.
- Murphy, A. H. (1993). *What is a good forecast? An essay on nature of goodness in weather forecasting*. Weather Forecasting, 8, pp 281-293.
- Neto, J., Ribeiro-Neto, A., Montenegro, S. (2014). *Assessment of rainfall-runoff models for flood river extreme event simulations*. In: Proceedings of the 6th International Conference on Flood

- Management (ICFM6). Disponível online em (<http://www.abrh.org.br/icfm6/proceedings/papers/PAP014409.pdf>), consultado em fevereiro 2015.
- NOAA-NWS (2000). *National Weather Service River Forecast System - Overview*. National Weather Service. Disponível online em (<http://www.nws.noaa.gov/iao/pdf/Manual.pdf>), consultado em abril 2012.
- NOAA-NWS (2011). *Sítio da Internet do "National Weather Service, Hydrometeorological Prediction Center": Ensemble Prediction Systems*. Disponível online em (<http://www.hpc.ncep.noaa.gov/ensembletraining/>), consultado em dezembro 2011.
- NOAA-NWS (2015). *Sítio da Internet do "National Weather Service": Community Hydrologic Prediction System (CHPS)*. Disponível online em (<http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/chps/>), consultado em dezembro 2015.
- Nobert, S., D. Demeritt, D., Cloke, H. (2010). *Using Ensemble Predictions for Operational Flood Forecasting: Lessons from Sweden*. Journal of Flood Risk Management, 3, pp 72-79.
- Nyeko, M. (2015). *Hydrologic Modelling of Data Scarce Basin with SWAT Model: Capabilities and Limitations*. Water Resources Management , 29, pp 81-94. doi:10.1007/s11269-014-0828-3.
- Pappenberger, F., Bogner, K., Wetterhall, F., He, Y., Thielen, J. (2011a). *Forecast convergence score: a forecaster's approach to analysing hydrometeorological forecast systems*, Advanced Geosciences, 29, pp 27-32.
- Pappenberger, F., Cloke, H., Parker, D., Wetterhall, F., Richardson, D., Thielen, J. (2015). *The monetary benefit of early flood warnings in Europe*. Environmental Science & Policy, 51, pp 278-291, doi:10.1016/j.envsci.2015.04.016.
- Pappenberger, F., Stephens, L., van Andel, S., Verkade, J., Ramos, M., Alfieri, L., Brown, J., Zappa, M., Ricciardi, G., Wood, A., Pagano, T., Marty, R., Collischonn, W., Le Lay, M., Brochero, D., Cranston, M., Meissner, D. (2013). *Operational HEPS systems around the globe*. HEPEX. Disponível em (<http://hepex.irstea.fr/operational-heps-systems-around-the-globe/>), consultado em janeiro de 2014.
- Pappenberger, F., Thielen, J., Del Medico, M. (2011b). *The impact of weather forecast improvements on large scale hydrology: analysing a decade of forecasts of the European Flood Alert System*. Hydrological Processes, 25(7):), 1091–1113. , doi: 10.1002/hyp.7772.
- Perica, S., Schaake, J., Seo, D. (1999). *National Weather Service River Forecast System (NWSRFS)*. Operational procedures for using short and long range precipitation forecasts as input to ensemble streamflow prediction (ESP). 79th Annual Meeting, 14th Conference on Hydrology. AMS Conference. Dallas.
- Profico Ambiente (2008). *Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua*. Estudo de Impacte Ambiental. Resumo Não Técnico, Vol. 1, abril de 2008, EDP - Gestão da Produção de Energia. Disponível online em (http://www.edp.pt/pt/sustentabilidade/EDPDocuments/AHFT_EIA_RT_VolI.pdf), consultado em janeiro 2011.

- Quintela, A., Portela, M. (2002). *A Modelação Hidrológica em Portugal nos Últimos 25 Anos do Século XX, nas Perspectivas Determinística, Probabilística e Estocástica*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 7, pp 51-64.
- Ramos, C. (2013). *Perigos Naturais devidos a Causas Meteorológicas: o caso das cheias e inundações*. E-LP Engineering and Technology Journal, V. 4. Disponível online em (<http://revistas.ulusofona.pt/index.php/revistae-lp/article/view/3320/2443>), consultado em julho 2015.
- Ramos, M., Bartholmes, J., Thielen, J. (2007). *Development of decision support products based on ensemble forecasts in the European Flood Alert System*. Atmospheric Science Letters, 8, pp 113-119.
- Ramos, M., Thielen, J., Pappenberger, F (2008). *Utilisation de la prévision météorologique d'ensemble pour la prévision hydrologique opérationnelle et l'alerte aux crues*. Colloque SHF - 191° CST - "Prévisions hydrométéorologiques", 18 e 19 de novembro 2008, Lyon.
- Refsgaard, J. (1997). *Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models*. Journal of Hydrology, 198, pp 69-97, doi: 10.1016/S0022-1694(96)03329-X.
- Reggiani, P., Kwadijk, J., Werner, M., Dijk, M., Schellekens, J., Kappel, R., Sprokkereef, E. (2003). *Modelling of hydrological responses; Delft-FEWS: an open shell flood forecasting platform*. EGS Congress, Nice.
- Reggiani, P., Verwey, A. (2005). *The European flood forecasting system*. NATO Workshop "Extreme hydrological events", Novosibirsk.
- Ribeiro, A. (1975). *Apontamentos de Hidráulica Aplicada – Hidrologia: Efeito regularizador de uma albufeira no amortecimento da ponta de cheia*. Laboratório de Hidráulica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ritter, A., Muñoz-Carpena, R. (2013). *Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments*. Journal of Hydrology, 480, 14, pp 33-45, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.12.004.
- Rodrigues, A., Saramago, M., Rodrigues, C., Lacerda, M., Rodrigues, R. (1998). *Evolução recente do sistema de vigilância e alerta de cheias*. 4º Congresso da Água, 23 a 27 de março de 1998, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa. Disponível online em (<http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/028.pdf>), consultado em janeiro 2011.
- Rodrigues, R., Brandão, C., Costa, J. (2001). *Hidrologia das cheias do Mondego de 26 e 27 de Janeiro de 2001*. Direção de Serviços de Recursos Hídricos, Instituto da Água, Lisboa. Disponível online em (http://snirh.pt/snirh/download/relatorios/cheias_mondego_2001.pdf), consultado em março 2011.
- Rodrigues, R., Brandão, C., Costa, J. (2003a). *Breve nota sobre as cheias no Tejo e o seu Sistema de Vigilância e Alerta*. Relatório Técnico, Direção de Serviços de Recursos Hídricos, Instituto da

- Água, Lisboa. Disponível online em (http://snirh.pt/snirh/download/relatorios/tejo_cheias2003.pdf), consultado em janeiro 2011.
- Rodrigues, R., Saramago, M., Gomes, R. (2003b). *SVARH*. Direção de Serviços de Recursos Hídricos, Instituto da Água, Lisboa. Disponível online em (http://snirh.pt/snirh/download/relatorios/svarh_out2003.pdf), consultado em janeiro 2011.
- Roe, J., Dietz, C., Restrepo, P., Halquist, J., Hartman, R., Horwood, R., Olsen, B., Opitz, H., Shedd, R., Wells, E. (2010). *NOAA's Community Hydrologic Prediction System*. 2nd Joint Federal Interagency Conference, 27 de junho a 1 de julho de 2010, Las Vegas. Disponível online em (http://acwi.gov/sos/pubs/2ndJFIC/Contents/7E_Roe_12_28_09.pdf), consultado em abril 2012.
- Roebber, P., Bosart, L. (1996). *The complex relationship between forecast skill and forecast value: A real-world analysis*. Weather Forecasting, 11, pp 544-559.
- Roo, J., Gouweleeuw, B., Thielen, J., Bartholmes, J., Bongioannini-Cerlini, P., Todini, E., Bates, P., Horritt, M., Hunter, N., Beven, K., Pappenberger, F., Heise, E., Rivin, G., Hils, M., Hollingsworth, A., Holst, B., Kwadijk, J., Reggiani, P., Van Dijk, M., Sattler, K., Sprokkereef, E. (2003). *Development of a European flood forecasting system*. International Journal of River Basin Management, 1, pp 49-59, doi:10.1080/15715124.2003.9635192.
- Ruas, H. (1936). *As cheias do Rios Mondego em 1935/1936*. Anuário dos Serviços Hidráulicos - 1936, Imprensa Nacional, 4º Ano, Lisboa.
- Sanches, R. (1996). *O problema secular do Mondego e a sua resolução*. Testemunhos, LNEC, Lisboa, ISBN: 972-49-1706-1.
- Santos, F., Marques, J., Simões, N., Mendes, P. (2013). *Modelação numérica de cheias fluviais e urbanas na bacia do Mondego*. Em: Riscos Naturais, antrópicos e mistos. Homenagem ao Professor Doutor Fernando Rebelo. Departamento de Geografia, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, pp 463-479, ISBN:978-989-96810-1-9.
- SCCN (2011). *Sítio da Internet do "Southwest Climate Change Network": Downscaling Techniques*. Disponível em (<http://www.southwestclimatechange.org/climate/modeling/downscaling>), consultado em dezembro 2011.
- Schaake, J., Hamill, T., Buizza, R., Clark, M., (2007). *HEPEX: The Hydrological Ensemble Prediction Experiment*. Bulletin of the American Meteorological Society, 88, pp 1541-1547, doi:10.1175/bams-88-10-1541.
- Seibert, S., Skublics, D., Ehret, U. (2014). *The potential of coordinated reservoir operation for flood mitigation in large basins – A case study on the Bavarian Danube using coupled hydrological–hydrodynamic models*. Journal of Hydrology, 517, pp 1128-1144, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.06.048.
- Silva, D. S. (2006). *À espera da cheia? Paradoxos da modificação do ambiente por via da tecnologia*. Tese de Mestrado, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

- Silva, F. (2015). *Otimização da gestão operacional de albufeiras de aproveitamentos de fins múltiplos em situações de cheia. Aplicação ao sistema Aguieira-Raiva-Fronhas*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil -Especialização de Hidráulica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Simonovic, S. (1992). *Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice*. Journal of Water Resources Planning and Management, 118 (3), pp 262-280.
- SNIRH (2004). *Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos*. Instituto da Água, Lisboa. Disponível online em (http://snirh.pt/snirh/download/relatorios/Folheto_PT_EN_FINAL.pdf), consultado em janeiro 2011.
- SNIRH (2011). *Sítio da Internet do "Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos": Dados de Base - monitorização*. Disponível online em (<http://snirh.pt/index.php?idMain=2&idItem=1>), consultado entre janeiro 2011 e janeiro de 2016.
- SNIRH (2012a). *Sítio da Internet do "Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos": Atlas da Água*. Disponível online em (<http://geo.snirh.pt/AtlasAgua/>), consultado em maio 2012.
- SNIRH (2012b). *Sítio da Internet do "Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos": Dados Sintetizados - Características das Albufeiras*. Disponível online em (<http://snirh.pt/index.php?idMain=1&idItem=7&albufcode=>), consultado em junho 2012.
- SNIRH (2015). *Sítio da Internet do "Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos": Dados de Base, Inundações, Zonas inundáveis e de risco de inundações (SIG)*. Disponível online em (<http://sniamb.apambiente.pt/Diretiva60CE2007/>), consultado em setembro de 2015.
- Szabó, J. (2007). *Decision Supporting Hydrological Model for River Basin Flood Control*. Digital Terrain Modelling, Geoinformation and Cartography, pp 145-182.
- Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, H., Roo, A. (2009). *The European Flood Alert System – Part 1 – Concept and development*. Hydrology and Earth System Sciences, 13, pp 125-140.
- Thiessen, AH (1911). *Precipitation averages for large areas*. Monthly Weather Review, 39 (7), pp 1082–1084. doi:10.1175/1520-0493(1911)39<1082b:PAFLA>2.0.CO;2.
- Tiwari, M., Chatterjee, C. (2010). *Development of an accurate and reliable hourly flood forecasting model using wavelet-bootstrap-ANN (WBANN) hybrid approach*. Journal of Hydrology, 394, pp 458-470, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.10.001.
- Todini, E., Alberoni, P., Butts, M., Collier, C., Khatibi, R., Samuels, P., Weerts, A. (2005). *ACTIF best practice – Understanding and reducing uncertainty in flood forecasting*. International Conference on Innovation Advances and Implementation of Flood Forecasting Technology, 17 a 19 de outubro de 2005, Tromsø.
- Troccoli, A., Mason, S., Harrison, M., Anderson, D., (2008). *Glossary of terms*. Em: A. Troccoli et al. (eds.), Seasonal Climate: Forecasting and Managing Risk, NATO Science Series, 82, pp 433-452, doi:10.1007/978-1-4020-6992-5.

- UNISDR (2002). *Guidelines for reducing Flood Losses. A contribution to the International Strategy for Disaster Reduction*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, United Nations. Disponível online em (http://www.un.org/esa/sustdev/publications/flood_guidelines.pdf), consultado em outubro 2011.
- Van Der Knijff, J., Younis, J., De Roo, A. (2010). *LISFLOOD: a GIS based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation*. International Journal of Geographical Information Science, 24(2), pp 189-212, doi:10.1080/13658810802549154.
- Vieira, J., Cunha, M., Nunes, L., Monteiro, J., Ribeiro, L., Stigter, T., Nascimento, J., Lucas, H. (2010). *Optimization of the operation of large-scale multisource water-supply systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, 137, pp 150-161.
- WCRP (2010). *Drought Predictability and Prediction in a Changing Climate: Assessing Current Predictive Knowledge and Capabilities, User Requirements and Research Priorities*. Draft White Paper, WCRP - World Climate Research Programme Workshop, 2 a 4 de março de 2010, Barcelona.
- Weerts, A., Schellekens, J., Weiland, F. (2010). *Real-Time Geospatial Data Handling and Forecasting: Examples From Delft-FEWS Forecasting Platform/System*. IEEE Journal of Selected Topic in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 3, pp 386-394.
- Wei, C., Hsu, N. (2008). *Multireservoir real-time operations for flood control using balanced water level index method*. Journal of Environmental Management, 88, pp 1624-1639.
- Werner, M., Cranston, M., Harrison, T., Whitfield, D., Schellekens, J. (2009). *Recent developments in operational flood forecasting in England, Wales and Scotland*. Meteorological Applications, 16, pp 13-22, doi:10.1002/met.124.
- Werner, M., Reggiani, P., Roo, A., Bates, P., Sprokkereef, E. (2005). *Flood Forecasting and Warning at River Basin and at the European Scale*. Natural Hazards, 36, pp 25-42.
- Werner, M., Schellekens, J., Gijsbers, P., van Dijk, M., van den Akker, O., Heynert, K. (2013). *The Delft-FEWS flow forecasting system*. Environmental Modelling & Software, 40, pp 65-77, doi:10.1016/j.envsoft.2012.07.010.
- Wilks, D.S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 2nd ed, ISBN: 978-0-12-385022-5.
- WMO (2007). *Fifteenth World Meteorological Congress*. WMO-No. 1026, Abridged final report with resolutions, ISBN 92-63-11026-3.
- WMO (2010a). *Workshop on the Strategy and Action Plan of the WMO Flood Forecasting Initiative*. Final Report, WMO Headquarters, 8-10 December 2009, Geneva.
- WMO (2010b). *Manual on the Global Data-processing and Forecasting System*. Volume I- Global Aspects (Annex IV to WMO Technical Regulations). WMO-No. 485, ISBN 978-92-63-10485-4.
- WMO (2011a). *Development of a Decision-Aiding Tool for the Selection of Flood Forecasting*. WMO Flood Forecasting Initiative. WMO Workshop on Intercomparison of Flood Forecasting Model,

- Koblenz, Germany, 14-16 September 2011. Disponível online em (http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/chy/chy14/documents/ms/INTERCOMAPRISON_FLOOD_FORECASTING_MODELS_DRAFT.pdf), consultado em junho de 2015.
- WMO (2011b). *Manual on Flood Forecasting and Warning*. WMO-No.1072, ISBN 978-92-63-11072-5.
- WMO (2013). *Decision-Support for the Selection of Flood Forecasting Models*. Disponível online em ([http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/documents/FFI/Intercomparison of flood forecasting models for review.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/documents/FFI/Intercomparison_of_flood_forecasting_models_for_review.pdf)), consultado em junho de 2015.
- Wood, A., Leung, L., Sridhar, V., Lettenmaier, D. (2004). *Hydrologic Implications of Dynamical and Statistical Approaches to Downscaling Climate Model Outputs*. Climatic Change, 62, pp 189-216.
- Wu, B., Chen, Y., Zeng, Y., Zhao, Y., Yuan, C. (2011). *Evaluation on effectiveness of carbon emission reduction of the power generation and shipping functions of the three gorges reservoir*. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 20, pp 257-261.
- Yang, N., Mei, Y., Zhou, C. (2012). *An optimal reservoir operation model based on ecological requirement and its effect on electricity generation*. Water resources management, 26, pp 4019-4028.
- Yapo, P., Gupta, H., Sorooshian, S. (1996). *Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data*. Journal of Hydrology, 181, pp 23-48, doi: 10.1016/0022-1694(95)02918-4.
- Yazdi, J., Neyshabouri, S. (2012). *Optimal design of flood-control multi-reservoir system on a watershed scale*. Natural hazards, 63, pp 629-646.
- Yilmaz, A., Imteaz, M., Ogwuda, O. (2010). *Accuracy of HEC-HMS and LBRM Models in Simulating Snow Runoffs in Upper Euphrates Basin*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 17(2), pp 342-347, doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000442.
- Zappa, M., Jaun, S., Germann, U., Walser, A., Fundel, F. (2011). *Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains*. Atmospheric Research, 100, pp 246-262, doi:10.1016/j.atmosres.2010.12.005.
- Zhao, T., Zhao, J., Lund, J., and Yang, D. (2014). *Optimal Hedging Rules for Reservoir Flood Operation from Forecast Uncertainties*. Journal of Water Resources Planning and Management, 140(12), 04014041, doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000432.
- Zhou, Y., Guo, S., Liu, P., Xu, C. (2014). *Joint operation and dynamic control of flood limiting water levels for mixed cascade reservoir systems*, Journal of Hydrology. 519(A), pp 248-257, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.07.029.

Fontes das fotografias:

- Coimbra Canal (2014). *Post It - Cheia no rio Mondego - Fevereiro 2014*. Coimbra Canal de 9/2/2014. Disponível online em (<http://www.coimbracanal.com/post-it-cheia-no-rio-mondego-fevereiro-2014/>), consultado em fevereiro de 2014.
- Marques, J., Pina, R. (2013). *Previsão ou Gestão de cheias? Um caso de estudo numa cidade de média dimensão Coimbra*. Seminário "Gestão dos Riscos na Região Centro", 2 e 3 de dezembro de 2013, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro. Disponível online em (http://www.ccdrc.pt/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=2986&Itemid=91), consultado em outubro de 2014.
- Público (2014). *Mau tempo provoca derrocadas em Coimbra e cheias em Águeda*. Jornal Público de 3/1/2014 . Disponível online em (<http://www.publico.pt/local/noticia/mau-tempo-provoca-derrocadas-em-coimbra-e-cheias-em-agueda-1618298>), consultado em janeiro 2014.
- SNIRH (2014). *Sítio da Internet do "Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos": Mediateca, Hidro-Album*. Disponível online em (<http://snirh.pt/index.php?idMain=5&idItem=7&Salbun=0&pesquisa=1&Spalavra=Mondego&Spalavra2=&Sbacia=0&Salbun=10011&Salbun2=0&Submit=PROCURAR>), consultado em setembro de 2014.
- Um Pinto de Luz (2013a). *Tempestade em Coimbra / Parque Mondego*. Blog "Um Pingo de Luz". Disponível online em (<http://umpigodeluz.blogspot.pt/2013/01/tempestade-em-coimbra-parque-mondego.html>), consultado em dezembro de 2013.
- Um Pinto de Luz (2013b). *Ponte pedonal da Praia Fluvial de Torres do Mondego e o Mau Tempo*. Blog "Um Pingo de Luz". Disponível online em (<http://umpigodeluz.blogspot.pt/2013/01/ponte-pedonal-da-praia-fluvial-de.html>), consultado em dezembro de 2013.
- Um Pinto de Luz (2013c). *Cheias e o Rio Mondego / Parque Mondego / Coimbra*. Blog "Um Pingo de Luz". Disponível online em (<http://umpigodeluz.blogspot.pt/2013/04/cheias-e-o-rio-mondego-parque-mondego.html>), consultado em dezembro de 2013.

ANEXOS

ANEXO 1 - DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE SIMULAÇÃO UTILIZADOS NA MODELAÇÃO HIDROLÓGICA.....	213
A.1.1. MÉTODO DO NÚMERO DE ESCOAMENTO DO SCS	215
A.1.2. MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO DO SCS	218
A.1.3. MÉTODO DE RECESSÃO	219
A.1.4. MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE	221
ANEXO 2 - DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE SIMULAÇÃO UTILIZADOS NA MODELAÇÃO HIDROLÓGICA.....	223
A.2.1. MEAN ABSOLUTE ERROR (MAE).....	225
A.2.2. MEAN CONTINUOUS RANK PROBABILITY SCORE (MCRPS)	225
A.2.3. BRIER SCORE (BS)	226
A.2.4. RELATIVE MEAN ERROR (RME)	226
A.2.5. RANK HISTOGRAM	227
A.2.6. RELATIVE OPERATING CHARACTERISTIC DIAGRAM (ROCD)	227
ANEXO 3 - RESULTADOS DOS PROCESSOS DE CALIBRAÇÃO E DE VERIFICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO	231
ANEXO 4 - ALGORITMOS DESENVOLVIDOS EM LINGUAGEM MATLAB PARA SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO OPERACIONAL DAS ALBUFEIRAS DA AGUIEIRA E DE FRONHAS	237
A.4.1. ALGORITMO REFERENTE AO MODELO DE OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO OPERACIONAL	229
A.4.2. ALGORITMO PARA APLICAÇÃO DO MODELO NA GESTÃO OPERACIONAL DE SITUAÇÕES REAIS	244
ANEXO 5 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA GESTÃO DO SISTEMA DE ALBUFEIRAS PARA DAS CHEIAS DE MARÇO DE 2013, DE JANEIRO DE 2014 E DE FEVEREIRO DE 2014	253
A.5.1. APLICAÇÃO AO PERÍODO DA CHEIA DE JANEIRO DE 2013 (DE 15 A 29/01/2013)	255
A.5.2. APLICAÇÃO AO PERÍODO DA CHEIA DE MARÇO / ABRIL DE 2013 (DE 23/03 A 06/04/2013).....	258
A.5.3. APLICAÇÃO AO PERÍODO DA CHEIA DE JANEIRO DE 2014 (DE 01 A 15/01/2014)	261

ANEXO 1

DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE SIMULAÇÃO UTILIZADOS NA MODELAÇÃO HIDROLÓGICA

A.1 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE SIMULAÇÃO UTILIZADOS NA MODELAÇÃO HIDROLÓGICA

A descrição dos métodos aqui exposta tem por base a informação presente no manual técnico do HEC-HMS (Feldman, 2000), sendo em alguns casos complementada com dados apresentados nos livros de Lencastre e Franco (2010) e Hipólito e Vaz (2011).

A.1.1. MÉTODO DO NÚMERO DE ESCOAMENTO DO SCS

O Método do Número de Escoamento do SCS foi utilizado para calcular o volume total de escoamento gerado através da precipitação.

Como explicado na descrição dos processos hidrológicos envolvidos na simulação hidrológica (ver 2.4.2), apenas uma parte de precipitação total que ocorre numa bacia hidrográfica gera escoamento direto. Essa parte designa-se normalmente por precipitação efetiva, precipitação útil ou excesso de precipitação. A parte da precipitação que não contribui diretamente para o escoamento direto designa-se por perdas de precipitação. Por este motivo, o método aqui descrito é frequentemente apresentado como um modelo de perdas de precipitação.

A precipitação efetiva é calculada em função da precipitação acumulada, das características do terreno e do grau de humidade do solo, através da seguinte equação:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \rightarrow \quad P > I_a \quad (\text{Eq. A 1})$$

Em que: P_e precipitação efetiva no instante t ; P é a precipitação total acumulada no instante t ; I_a é a retenção inicial, ou seja, a perda de precipitação inicial; e S a retenção potencial máxima, que representa a capacidade da sub-bacia em reter água.

No entanto, a equação anterior só é aplicada quando o valor da precipitação total acumulada exceder o valor da retenção inicial. Enquanto a precipitação acumulada não superar a retenção inicial, a precipitação efetiva, e consequentemente o escoamento direto, será igual a zero.

$$P_e = 0 \quad \rightarrow \quad P \leq I_a \quad (\text{Eq. A 2})$$

A retenção inicial pode ser estimada através da relação empírica proposta pelo SCS:

$$I_a = 0,2 S \quad (\text{Eq. A 3})$$

A retenção potencial máxima está relacionada com as características do terreno, através do parâmetro CN (ver descrição em 3.2.2.1.), calculando-se da seguinte forma:

$$S = \frac{25\,400}{CN} - 254 \quad (\text{unidades SI}) \quad (\text{Eq. A 4})$$

Segundo o SCS, os valores de CN podem variar desde cerca de 30, em solos com elevada permeabilidade e elevadas taxas de infiltração, até 100, em superfícies impermeáveis ou em massas de água (Feldman, 2000).

O valor de CN depende do tipo hidrológico do solo, da sua utilização e do seu estado de humidade anterior. No Quadro A1.1 apresentam-se valores de referência do parâmetro CN para diferentes utilizações e tipos hidrológicos do solo, e para um estado de humidade anterior médio (AMC-II).

Quando o solo estiver próximo da saturação, em consequência da ocorrência de eventos de precipitação anteriores, o valor de CN deverá ser aumentado, uma vez que a capacidade de infiltração do solo está reduzida. Por outro lado, quando o solo estiver muito seco, o CN deverá ser ajustado no sentido oposto. No Quadro A1.2 apresenta-se a correspondência dos números de escoamento para os diferentes estados de humidade do solo, sendo: AMC-I a situação seca, AMC-II a situação média e AMC-III a situação húmida (Lencastre e Franco, 2010; Hipólito e Vaz, 2011).

Quadro A.1.1 - Valores de referência do parâmetro CN, segundo o SCS, para várias utilizações e tipos hidrológicos do solo, considerando um estado de humidade anterior médio (AMC-II) (adaptado de Lencastre e Franco, 2010)

Utilização ou cobertura do solo	Tipo hidrológico do solo*			
	A	B	C	D
Terras lavradas				
não cultivadas	72	81	88	91
cultivadas	62	71	78	81
Pastagens				
pobres	68	79	86	89
boas	39	61	74	80
Prados em boas condições	30	58	71	78
Florestas				
pouco densas	45	66	77	83
densas	25	55	70	77
Espaços abertos relvados, campos de golf, cemitérios, etc.:				
em boas condições (cobertura com 75% ou mais de relva)	39	61	74	80
em fracas condições (cobertura com 50% a 75% de relva)	49	69	79	84
Áreas comerciais (85% de impermeabilização)	89	92	94	95
Zonas industriais 72% de impermeabilização)	81	88	91	93
Áreas residenciais, com impermeabilização média de:				
65%	77	85	90	92
38%	61	75	83	87
30%	57	72	81	86
25%	54	70	80	85
20%	51	68	79	84
Parques pavimentados, telhados, passeios, etc.	98	98	98	98
Ruas e estradas:				
pavimentadas com sarjetas e coletores	98	98	98	98
empedradas	76	85	89	91
em terra batida	72	82	87	89

*Tipos hidrológicos de solos:

- Tipo A: solos com baixo potencial de escoamento superficial e elevada intensidade de infiltração, mesmo quando totalmente encharcados. Inclui sobretudo os solos arenosos profundos, com boa drenagem.
- Tipo B: solos com potencial de escoamento superficial abaixo da média e intensidade de infiltração moderada quando totalmente encharcados. Incluem maioritariamente solos medianamente drenados.
- Tipo C: solos com potencial de escoamento superficial acima da média e intensidade de infiltração baixas quando totalmente encharcados. Incluem principalmente solos com camadas impermeáveis subjacentes e solos com textura moderadamente fina.
- Tipo D: solos com elevado escoamento superficial potencial e intensidade de infiltração muito baixa quando totalmente encharcados. São essencialmente constituídos por solos argilosos expansíveis, solos em zonas em que o nível freático está constantemente próximo da superfície e solos com substratos impermeáveis a pouca profundidade.

Quadro A.1.2 - Correspondência dos números de escoamento para os diferentes estados de humidade do solo, em que: AMC-I a situação seca, AMC-II a situação média e AMC-III a situação húmida (adaptado de Hipólito e Vaz, 2011).

Estado de humidade do solo	Número de escoamento, CN														
AMC -I	100	87	78	70	63	57	51	45	40	35	31	26	22	18	15
AMC -II	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
AMC -III	100	98	96	94	91	88	85	82	78	74	70	65	60	55	50

A.1.2. MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO DO SCS

O Método do Hidrograma Unitário do SCS foi utilizado para simular o escoamento direto. Este método tem como base um hidrograma unitário sintético adimensional, definido pelo SCS a partir de dados de dados de precipitação e escoamento medidos num elevado número de pequenas bacias rurais ao longo dos EUA.

O referido hidrograma é apresentado na Figura A1.1, cujas coordenadas adimensionais são expressas em t/T_p e U_t/U_p , em que: t é a variável tempo; T_p é o tempo que decorre entre o início e o pico do hidrograma, também designado como tempo de crescimento do hidrograma ou tempo para o pico; U_t é a variável correspondente ao caudal e, U_p é o valor do caudal máximo do hidrograma ou caudal de ponta.

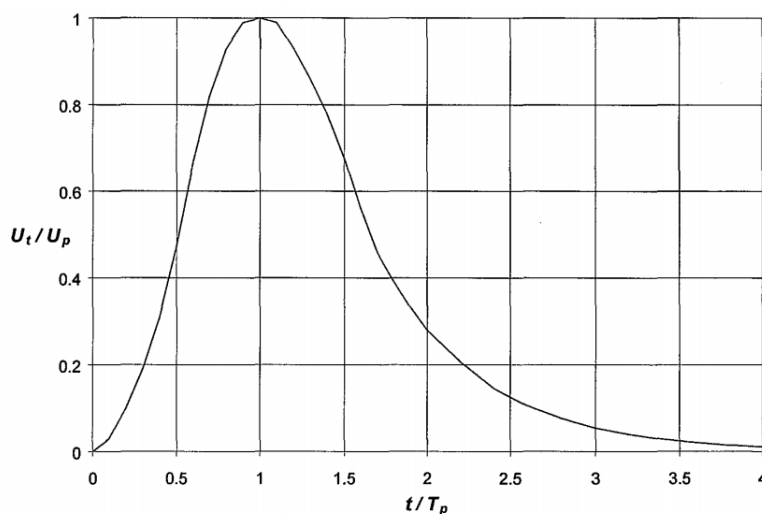


Figura A.1.1 – Hidrograma Unitário adimensional do SCS (Feldman, 2000).

Segundo o SCS, o valor do caudal de ponta, U_p , está relacionado com o tempo para o pico, T_p , sendo estes valores determinados da seguinte forma:

$$U_p = C \frac{A}{T_p} \quad (\text{Eq. A 5})$$

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (\text{Eq. A 6})$$

Em que: A é a área da bacia; C é uma constante de conversão igual a 2,08 no caso da utilização do sistema de unidades SI; Δt é a duração da precipitação efetiva e t_{lag} é o tempo de resposta da bacia, definido como a diferença de tempo entre o centróide do hietograma da precipitação efetiva e o pico do hidrograma.

O tempo de resposta da bacia, t_{lag} , pode ser estimado por um processo iterativo de calibração. No entanto, para calcular o valor inicial a usar no processo de calibração ou para estimar um valor aproximado a utilizar em situações em a calibração desse parâmetro possa ser um processo complicado devido à falta de dados para comparação, o SCS recomenda que se considere que o tempo de atraso corresponde a 60% do tempo de concentração da bacia, t_c (Feldman, 2000).

$$t_{lag} = 0,6 t_c \quad (\text{Eq. A 7})$$

Por sua vez, a fórmula do SCS para calcular o tempo de concentração pode ser expressa do seguinte forma (Hipólito e Vaz, 2011):

$$t_c = 0.093 \frac{L^{0.8}}{i^{0.5}} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7} \quad (\text{Eq. A 8})$$

Em que: t_c representa o tempo de concentração (em horas); L é a distância à secção de referência do ponto, da respetiva sub-bacia, que se encontra cinematicamente mais afastado (em km); i é a inclinação média da sub-bacia e CN é o número de escoamento.

A.1.3. MÉTODO DE RECESSÃO

O Método de Recessão foi utilizado para simular o escoamento de base, ou seja, a drenagem subterrânea lenta existente das massas de água subterrâneas para as linhas de água.

O Método de Recessão implementado no programa HEC-HMS consiste no modelo de recessão exponencial do escoamento de base, traduzido através da seguinte expressão:

$$Q_t = Q_0 R^t \quad (\text{Eq. A 9})$$

Em que: Q_t representa o caudal proveniente do escoamento de base no instante t; Q_0 representa o caudal no instante inicial da simulação e R é a constante de recessão ou de decaimento exponencial.

Este método é adequado para representar o comportamento típico observado em bacias quando o caudal na linha de água diminui exponencialmente depois do evento.

Na Figura A1.2 ilustra-se o método aqui descrito, onde a área a preto representa o escoamento de base, que diminui exponencialmente desde o instante inicial. A soma do escoamento de base com o escoamento direto corresponde ao escoamento total na linha de água.



Figura A.1.2 – Hidrograma com a representação da recessão do escoamento de base inicial (adaptado de Feldman, 2000).

A constante de recessão, R , pode ser obtida por via de calibração, ou se existirem registos de caudais na secção de referência da sub-bacia, pode ser estimado um valor aproximado analisando a relação entre o valor do escoamento num determinado dia, anterior ao início do evento de precipitação, e os valores nos dias anteriores. Para modelar o decaimento do escoamento de base em bacias naturais, a constante de recessão terá de ser ter valores compreendidos entre 0 e 1.

O caudal no instante inicial da simulação é uma condição inicial do método que tem de ser conhecida. No HEC-HMS pode ser definido como um valor total por sub-bacia (m^3/s) ou então um valor por área de sub-bacia ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$).

O método aqui apresentado é principalmente adequado para simulação de eventos isolados (ver Figura A.1.3). Contudo, neste método há a opção de repor automaticamente o escoamento inicial depois de cada evento de precipitação, de modo a poder ser usado em simulações de eventos sucessivos (ver Figura A.1.4).

Para aplicação deste método no HEC-HMS, é necessário definir também um limiar no ramo descendente do hidrograma de cheia (designado anteriormente por relação ao pico), que estabelece o momento em que cessa a recessão do escoamento de base que tem lugar a partir de Q_0 e o modelo de recessão é aplicado novamente partindo desse novo ponto até ao início de um novo evento de precipitação, definindo o escoamento total nesse trecho do hidrograma (ver Figuras A.1.3 e A.1.4). O correspondente escoamento de base no trecho posterior ao limiar é avaliado de modo indireto, subtraindo ao escoamento total definido pela curva de recessão o escoamento direto obtido pela aplicação dos outros métodos que, para o efeito, tenham sido previamente seleccionados (como por exemplo os restantes métodos aqui apresentados).

O limiar assim definido pode ser obtido por via de calibração ou pode ser estimado através da análise de um gráfico dos caudais observados ao longo do tempo, na secção de referência da sub-bacia.

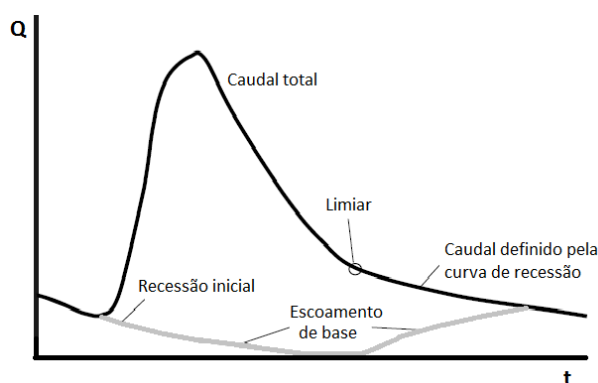


Figura A.1.3 – Ilustração do método de recessão aplicado a um evento de precipitação (adaptado de Feldman, 2000).

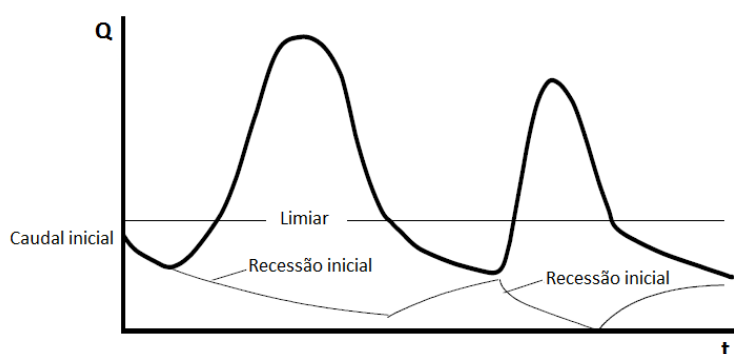


Figura A.1.3 – Ilustração do método de recessão aplicado a mais de um evento de precipitação (adaptado de Feldman, 2000).

A.1.4. MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE

O Método de Muskingum-Cunge foi utilizado para simular o escoamento ao longo das linhas de água. Este método calcula o hidrograma efluente de um troço fluvial a partir do hidrograma afluente a esse elemento, utilizando a seguinte equação:

$$O_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_{t-1} + C_4 (q_L \Delta x) \quad (\text{Eq. A 10})$$

Em que: O_t e O_{t-1} são os valores do caudal efluente nos momentos t e $t-1$, respetivamente; I_t e I_{t-1} são os valores dos caudais afluentes respetivamente nos momentos t e $t-1$; q_L é o caudal afluente lateral; Δx é intervalo de cálculo espacial ao longo do comprimento do troço fluvial e C_1 , C_2 , C_3 e C_4 são coeficientes dados por:

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad (\text{Eq. A 11})$$

$$C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad (\text{Eq. A 12})$$

$$C_3 = \frac{2(1-X) - \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad (\text{Eq. A 13})$$

$$C_4 = \frac{2 \cdot \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad (\text{Eq. A 14})$$

Os parâmetros K e X são calculados da seguinte forma:

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (\text{Eq. A 15})$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{B S_0 c \Delta x} \right) \quad (\text{Eq. A 16})$$

Em que: Δt é intervalo de cálculo temporal; B é a largura do escoamento à superfície; S_0 é a inclinação do talvegue; e c é a celeridade da onda cinemática, calculada do seguinte modo:

$$c = \frac{dQ}{dA} \quad (\text{Eq. A 17})$$

Em que Q é o caudal de referência e A é a área do escoamento.

Devido à variação de vários parâmetros do método ao longo do tempo, o HEC-HMS resolve o método de Muskingum-Cunge numericamente, mediante a aplicação de algoritmos de cálculo.

ANEXO 2

DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS PREVISÕES HIDROLÓGICAS

A.2 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS PREVISÕES HIDROLÓGICAS

A descrição aqui exposta sobre os métodos utilizados na presente tese para avaliação da qualidade das previsões hidrológicas tem por base as informações obtidas nos trabalhos realizados por Brown *et al.* (2010), CAWCR (2015) e Fan (2015).

A.2.1. MEAN ABSOLUTE ERROR (MAE)

A MAE mede a diferença média absoluta entre as previsões determinísticas e as correspondentes observações para cada período de previsão. Dessa forma, quanto mais próximo o valor de MAE estiver de zero, melhores são as previsões, pois menores são as diferenças entre as previsões e as observações correspondentes. Esta medida é calculada através da seguinte equação:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{Prev,i} - Q_{Obs,i}| \quad (\text{Eq. A 18})$$

Em que: n é o número total de avaliações realizadas; i é uma dada avaliação; $Q_{Prev,i}$ é o caudal previsto e $Q_{Obs,i}$ é o valor correspondente do caudal observado. Esta equação é aplicada a cada um dos períodos de previsão.

A.2.2. MEAN CONTINUOUS RANK PROBABILITY SCORE (MCRPS)

O *Continuous Rank Probability Score* (CRPS) resume a qualidade de uma previsão contínua por *ensemble* num único valor, através da aplicação da seguinte equação:

$$CRPS = \int_{-\infty}^{+\infty} [F_{Q_{Prev}}(Q_{Prev}) - F_{Q_{Obs}}(Q_{Prev})]^2 dQ_{Prev} \quad (\text{Eq. A 19})$$

Em que: $F_{Q_{Prev}}(Q_{Prev})$ é a função de distribuição acumulada da previsão e $F_{Q_{Obs}}(Q_{Prev})$ é uma função de distribuição acumulada da correspondente observação, que assume valores iguais a 1 para valores de Q_{Prev} maiores ou iguais à observação correspondente e zero nos restantes casos.

No entanto, na prática, a CRPS é empregue através da média de n pares de previsões e observações, o que leva à obtenção do MCRPS, calculado da seguinte forma:

$$MCRPS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n CRPS_i \quad (\text{Eq. A 20})$$

O valor numérico do MCRPS é variável consoante o tipo de aplicação e não é diretamente interpretável em termos de erros específicos na previsão.

O MCRPS é usado especificamente para avaliar previsões por *ensemble*, pois se esta medida for aplicada a previsões determinísticas os resultados serão exatamente iguais ao da MEA. Isto acontece porque a função probabilidade acumulada de uma previsão determinística é sempre igual a 1 (ocorrência de um único valor previsto).

A.2.3. BRIER SCORE (BS)

O BS permite avaliar o erro com que são previstos eventos discretos, através da distribuição de previsões por *ensemble*. Este índice mede o erro quadrático médio da probabilidade de uma previsão para a ocorrência de um evento específico, como a excedência de um dado limiar de cheia.

O índice BS é assim, uma medida análoga ao erro quadrático médio de uma previsão determinística, mas as previsões e, consequentemente, as unidades de erro, são dadas em probabilidades ao quadrado.

Os valores de BS são obtidos calculando a diferença entre a probabilidade de um determinado evento definido ser previsto pelo conjunto de previsões e a probabilidade da sua ocorrência efetiva, esta última assume valores iguais a zero, quando o evento não ocorre, e de um, quando o evento ocorre. No caso de previsões por *ensemble*, a probabilidade de ocorrência do evento discreto é calculada considerando que todos os membros da previsão por *ensemble* têm a mesma probabilidade, e determina-se assim através da percentagem dos membros que se encontram acima do limiar definido. A fórmula matemática deste índice é a seguinte:

$$BS(E) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(F_{Q_{Prev,i}}(E) - F_{Q_{Obs,i}}(E) \right)^2 \quad (\text{Eq. A 21})$$

Em que: em que n é o número total de previsões avaliadas; i é uma dada avaliação; E é o evento correspondente à igualdade ou excedência do limiar definido; $F_{Q_{Prev,i}}(E)$ é a probabilidade de excedência do limiar calculado através do conjunto de previsões; $F_{Q_{Obs,i}}(E)$ é uma função que tem valor 1 quando o evento definido ocorre, e zero quando o evento não ocorre (obtido através das observações). A equação deve ser aplicada para cada período de previsão.

Note-se que o índice BS pode assumir valores entre zero e um, uma vez que esta é a maior diferença possível entre a probabilidade prevista (que deve ser entre zero e um) e o resultado real (que apenas assume valores de 0 ou 1).

A.2.4. RELATIVE MEAN ERROR (RME)

O RME mede a diferença média entre as previsões determinísticas e as observações correspondentes para cada período de previsão, dividida pelo valor médio das observações. A sua fórmula de cálculo é a seguinte:

$$RME = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Prev,i} - Q_{Obs,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{Obs,i}} \quad (\text{Eq. A 22})$$

Em que: n é o número total de avaliações realizadas; i é uma dada uma avaliação; $Q_{Prev,i}$ é o caudal previsto e $Q_{Obs,i}$ é o valor correspondente do caudal observado. Esta equação é aplicada a cada um dos períodos de previsão.

O RME fornece uma medida do viés relativo, de primeira ordem, existente nas previsões, podendo tomar valores positivos, negativos, ou iguais a zero. Quanto mais próximo os valores de RME estiverem de zero, melhores são considerados os resultados das previsões, pois menores são as diferenças entre as previsões e as observações correspondentes. Valores positivos desta medida

representam uma sobrestimação média das previsões avaliadas e valores negativos representam o oposto. Valores iguais a zero indicam a inexistência de viés relativo nas previsões avaliadas.

A.2.5. RANK HISTOGRAM

O *Rank Histogram* é um histograma que permite avaliar de forma simples a confiança condicional (ou espalhamento) das previsões por *ensemble*, e consiste em contar o número de casos em que os valores observados se situaram entre quaisquer dois membros ordenados na distribuição das previsões por *ensemble*, em todas as n previsões avaliadas, para cada período de previsão.

Normalmente, cada classe do hidrograma corresponde a uma posição entre os membros ordenados do *ensemble*, e acima e abaixo deles. Contudo, quando o número de membros é muito grande, é comum agrupar-se os resultados num menor número de classes.

Em teoria, segundo esta forma de avaliação, um sistema de previsão por *ensemble* com espalhamento perfeito produz, para cada período de previsão avaliado, um histograma horizontalmente uniforme, ou seja, com uma frequência idêntica de observações em todas as classes.

Quando o histograma apresenta uma forma em “U”, mostrando que muitas das observações se situaram nas caudas do histograma, ou seja, que as observações ocorreram muitas vezes acima e muitas vezes abaixo dos membros das previsões por *ensemble*, isso indica que o sistema de previsão tem falta de espalhamento.

Por outro lado, considera-se que um sistema tem excesso de espalhamento quando as observações se concentram maioritariamente na zona central da distribuição dos membros das previsões por *ensemble*, sendo isso expresso através de um histograma em forma de triângulo ou “U” invertido.

Outros formatos do histograma podem ser indicativos de desvios sistemáticos nas previsões por *ensemble*. Por exemplo, um histograma com uma tendência decrescente (ou forma de “L”) indica que as observações se situaram com maior frequência abaixo da maioria dos membros das previsões por *ensemble* – a esta situação chama-se viés positivo. Contrariamente, quando o histograma apresenta uma forma crescente (ou em “L” invertido), isso indica que o viés é negativo, ou seja, que as observações se situaram maioritariamente acima da maioria dos membros do *ensemble*.

Desta forma, o *Rank Histogram* dá uma medida do espalhamento das previsões por *ensemble* no período de previsão avaliado, indicando quais são as posições entre os membros das previsões por *ensemble* onde as observações mais se situaram.

Este tipo de histograma pode ser gerado para todo o conjunto de previsões, ou apenas para subconjuntos definidos, como por exemplo, para situações em que as observações se situaram acima de um determinado limiar.

A.2.6. RELATIVE OPERATING CHARACTERISTIC DIAGRAM (ROCD)

O ROCD é um diagrama que permite avaliar a qualidade de um sistema de previsão para a ocorrência de um evento discreto, como a excedência de um limiar de uma cheia. É uma avaliação baseada na

tabela de contingência apresentada na Figura A2.1, com as quatro combinações possíveis entre a previsão e a ocorrência do evento definido.

		Evento observado?	
		SIM	NÃO
Evento previsto?	SIM	a	b
	NÃO	c	d

Figura A.2.1 – Tabela de contingência para um evento discreto.

Para a composição do ROCd, para cada um dos períodos de previsão são calculados dois índices: o POD (*Probability of Detection*) e o POFD (*Probability of False Detection*), através das seguintes fórmulas:

$$POD(L, p_L) = \frac{\sum_{i=1}^n 1\{1 - F_{Q_{Prev,i}}(L) > p_L | Q_{Obs,i} > L\}}{\sum_{i=1}^n 1\{Q_{Obs,i} > L\}} \quad (\text{Eq. A 23})$$

$$POFD(L, p_L) = \frac{\sum_{i=1}^n 1\{1 - F_{Q_{Prev,i}}(L) > p_L | Q_{Obs,i} \leq L\}}{\sum_{i=1}^n 1\{Q_{Obs,i} \leq L\}} \quad (\text{Eq. A 24})$$

Em que: em que n é o número total de previsões avaliadas; i é uma dada avaliação; L é o limiar definido para a ocorrência de um evento; p_L é a probabilidade de ocorrência do limiar L ; $F_{Q_{Prev,i}}(L)$ é a probabilidade de excedência do limiar calculado através do conjunto de previsões; $Q_{Obs,i}$ é o valor observado correspondente à previsão avaliada e $1\{\}$ é uma função que toma valores iguais a 1 quando o evento definido no seu interior ocorre, e zero quando o evento não ocorre. Estas equações devem ser aplicadas também a cada um dos períodos de previsão.

Os valores ótimos de POD são iguais a 1, pois isso indica que as previsões avaliadas acertam sempre na ocorrência do evento definido. Tendo em conta a tabela de contingência da Figura A.2.1, esta situação corresponde a todas as previsões avaliadas se situarem no quadrante a . A POD pode assim ser traduzida pela percentagem de vezes em que o sistema de previsão efetivamente acertou na previsão da ocorrência do evento, sempre que o mesmo ocorreu (considerando a tabela de contingência, $POD = a/(a + c)$).

Por outro lado, os valores ótimos de POFD são iguais a zero, o que significa que nunca são emitidos alarmes falsos (todas as situações situadas no primeiro quadrante c da tabela de contingência). A POFD pode assim ser traduzida pela percentagem de vezes em que o sistema de previsão efetivamente errou na previsão da ocorrência do evento, sempre que o mesmo não ocorreu (considerando a tabela de contingência, $POFD = b/(b + c)$).

O ROCd consiste então num gráfico onde se representa a probabilidade de deteção (POD) de um sistema de previsão – no eixo das ordenadas –, em função da sua probabilidade de falsa deteção

(POFD) – no eixo das abcissas. Deste modo, a qualidade ideal de um sistema de previsão é representada por um ponto situado no canto superior esquerdo do diagrama (POD=1 e POFD=0).

O ROCD com apenas um ponto representa a qualidade de um determinado sistema de previsão determinístico. Para previsões por *ensemble*, o ROCD é traçado utilizando a distribuição dos membros para a transformação do conjunto em múltiplas previsões determinísticas dadas pelos diferentes percentis do *ensemble*, como explicado em 3.5.1. Desta forma, o diagrama de uma previsão por *ensemble* corresponde a uma curva, já que ele possui vários pontos – um ponto para cada percentil considerado (Figura A.2.2).

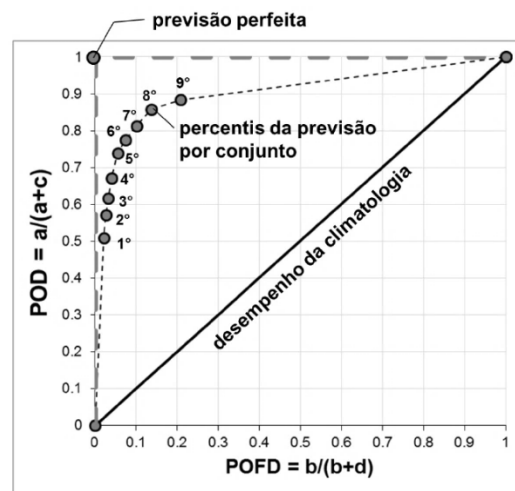


Figura A.2.2 – Exemplo de um ROCD para uma previsão por *ensemble* (Fan, 2015).

Como se pode observar no exemplo apresentado na Figura A2.2, a utilização dos percentis mais elevados da previsão por *ensemble* (pontos 8 e 9 representados no gráfico, por exemplo) geralmente dá origem a valores mais elevados da POD, contudo o número de falsos alarmes (também conhecidos por “*crying wolfs*”) – indicado pela POFD – também é maior. Por outro lado, utilizando percentis pequenos esperam-se menos alarmes falsos, mas a probabilidade de detenção dos eventos também é menor.

Desta forma, o ROCD pode ser um instrumento útil na decisão de qual é o percentil das previsões por *ensemble* mais adequado para ser utilizado para a tomada de decisões operacionais, tendo em conta a sensibilidade ao risco e os erros aceitáveis na aplicação em questão.

ANEXO 3

RESULTADOS DOS PROCESSOS DE CALIBRAÇÃO E DE VERIFICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

Quadro A.3.1 – Resultados do processo de calibração, obtidos para a secção de controlo da Aguieira (valores da Figura 60).

Data de início da simulação	Parâmetros de calibração ajustados		Variáveis hidrometeorológicas			Indicadores de desempenho	
	CN	R	RV ₋₅ (hm ³)	TP ₊₃ (mm)	TP ₋₆₀ (mm)	PBIAS (%)	NS
14-Dec-13	30	0,7	2,8	9,5	188,4	-120,32	-3,52
15-Dec-13	30	0,7	2,9	2,0	197,1	-89,77	0,28
16-Dec-13	30	0,7	2,5	0,5	194,1	-72,21	0,54
17-Dec-13	30	0,7	2,8	3,2	194,0	-71,43	0,44
18-Dec-13	30	0,7	2,7	20,0	194,0	-63,32	0,46
19-Dec-13	30	0,7	2,7	61,8	167,1	-56,73	0,42
20-Dec-13	30	0,7	6,0	59,9	165,1	9,12	0,87
21-Dec-13	30	0,7	8,9	43,0	210,2	8,83	0,85
22-Dec-13	30	0,7	11,2	1,0	204,2	0,27	0,78
23-Dec-13	30	0,7	12,8	4,7	172,8	-2,68	0,73
24-Dec-13	30	0,7	14,2	20,2	172,0	-2,78	0,73
25-Dec-13	30	0,7	28,3	93,8	127,2	8,32	0,71
26-Dec-13	40	0,7	63,7	118,3	201,3	12,82	0,80
27-Dec-13	50	0,7	79,8	114,4	229,4	9,07	0,82
28-Dec-13	60	0,7	95,7	46,9	241,5	-4,17	0,77
29-Dec-13	60	0,7	115,7	37,8	256,1	-5,65	0,76
30-Dec-13	60	0,7	113,9	26,6	263,0	-6,11	0,74
31-Dec-13	60	0,7	87,9	20,2	263,2	-0,56	0,75
1-Jan-14	60	0,7	85,9	18,0	273,0	2,38	0,79
2-Jan-14	60	0,7	84,5	27,3	284,3	9,85	0,76
3-Jan-14	60	0,7	105,8	44,4	290,4	2,67	0,80
4-Jan-14	70	0,7	149,4	68,0	334,2	8,79	0,79
5-Jan-14	80	0,7	180,4	80,0	340,5	-4,82	0,52
6-Jan-14	80	0,7	198,8	85,4	359,1	18,25	0,36
7-Jan-14	80	0,7	208,9	45,6	360,9	9,65	0,46
8-Jan-14	80	0,7	217,1	25,6	373,6	-6,48	0,10
9-Jan-14	70	0,9	187,2	28,1	377,9	-10,64	-0,48
10-Jan-14	70	0,9	164,4	31,8	377,7	-3,12	-0,32
11-Jan-14	70	0,9	145,0	30,2	377,7	3,76	-0,38
12-Jan-14	70	0,9	132,8	5,3	377,7	-6,71	-2,56

Quadro A.3.2 – Resultados do processo de calibração, obtidos para a secção de controlo de Fronhas (valores da Figura 61).

Data de início da simulação	Parâmetros de calibração ajustados		Variáveis hidrometeorológicas			Indicadores de desempenho	
	CN	R	RV ₋₅ (hm ³)	TP ₊₃ (mm)	TP ₋₆₀ (mm)	PBIAS (%)	NS
14-Dec-13	30	0,7	5	10,3	169,0	-3,84	0,34
15-Dec-13	30	0,7	4,3	3,1	168,0	-21,73	-0,37
16-Dec-13	30	0,7	3,6	0,2	168,0	-26,11	0,63
17-Dec-13	30	0,7	2,8	2,3	168,0	-17,32	0,64
18-Dec-13	30	0,7	2,1	18,5	142,0	-17,67	0,62
19-Dec-13	30	0,7	1,5	68,7	133,0	-12,67	0,55
20-Dec-13	30	0,7	2,7	67,1	183,0	9,38	0,63
21-Dec-13	30	0,7	4,5	50,9	178,0	22,86	0,63
22-Dec-13	40	0,7	5,6	0,8	148,0	-11,40	0,48
23-Dec-13	40	0,7	6,7	4,5	149,0	-13,98	0,42
24-Dec-13	40	0,7	7,3	22,4	115,0	-17,93	0,65
25-Dec-13	40	0,7	7,7	87,2	174,0	14,73	0,81
26-Dec-13	50	0,7	14,5	111,2	202,0	9,41	0,85
27-Dec-13	60	0,7	17,4	100,5	209,0	9,20	0,84
28-Dec-13	60	0,7	20,1	43,8	225,0	18,35	0,79
29-Dec-13	60	0,7	23,9	38,0	231,0	12,62	0,68
30-Dec-13	60	0,7	24,9	31,1	231,0	14,90	0,63
31-Dec-13	70	0,7	18,3	22,7	238,0	2,42	0,57
1-Jan-14	70	0,7	16,8	16,4	249,0	7,06	0,55
2-Jan-14	80	0,7	15,6	26,2	257,0	-1,47	0,45
3-Jan-14	80	0,7	22	45,9	310,0	-24,22	0,19
4-Jan-14	80	0,7	37,9	83,6	329,0	-4,92	0,55
5-Jan-14	80	0,7	48,5	103,3	345,0	-1,04	0,46
6-Jan-14	80	0,7	56,3	104,0	347,0	5,32	0,38
7-Jan-14	80	0,7	62,1	51,8	362,0	8,10	0,26
8-Jan-14	80	0,7	62,4	24,0	370,0	-2,17	0,51
9-Jan-14	70	0,7	51,9	34,0	370,0	9,57	0,03
10-Jan-14	70	0,7	44,9	37,4	370,0	7,19	-3,09
11-Jan-14	70	0,7	38,4	35,6	370,0	-15,43	-5,59
12-Jan-14	70	0,7	32,9	5,3	370,0	7,04	-5,72

Quadro A.3.3 – Resultados do processo de verificação, obtidos para a secção de controlo de Agueira (valores da Figura 63).

Data da simulação	Variáveis hidrometeorológicas			Parâmetros de calibração		Indicadores de desempenho	
	RV ₋₅ (hm ³)	TP ₊₃ (mm)	TP ₋₆₀ (mm)	CN	R	PBIAS (%)	NS
11-Jan-13	13,1	23,2	254	30	0,70	-44	0,49
12-Jan-13	13,2	19,3	254	30	0,70	-35	0,52
13-Jan-13	12,6	3,4	258	30	0,70	-18	0,74
21-Mar-13	68,2	15,5	416	40	0,90	20	0,64
22-Mar-13	66,7	37,5	382	40	0,90	7	0,52
23-Mar-13	64,9	58,1	369	40	0,90	8	0,44
04-Fev-14	73,6	70,4	545	50	0,90	7	0,20
05- Fev-14	75,2	55,2	555	50	0,90	-3	-0,54
06- Fev-14	86,5	57,5	583	60	0,90	-16	-0,84

Quadro A.3.4 – Resultados do processo de verificação, obtidos para a secção de controlo de Fronhas (valores da Figura 64).

Data da simulação	Variáveis hidrometeorológicas			Parâmetros de calibração		Indicadores de desempenho	
	RV ₋₅ (hm ³)	TP ₊₃ (mm)	TP ₋₆₀ (mm)	CN	R	PBIAS (%)	NS
11-Jan-13	5,0	32,5	257	40	0,70	11	0,72
12-Jan-13	5,1	27,0	263	40	0,70	16	0,63
13-Jan-13	5,3	6,9	283	40	0,70	15	0,52
21-Mar-13	23,0	10,3	315	60	0,90	31	0,47
22-Mar-13	22,2	30,2	282	70	0,90	17	0,50
23-Mar-13	21,0	42,4	270	70	0,90	18	0,45
04-Fev-14	28,8	64,1	541	70	0,90	9	0,16
05- Fev-14	30,7	72,7	562	80	0,90	-3	-0,88
06- Fev-14	34,7	49,8	595	80	0,90	-9	-1,00

ANEXO 4

ALGORITMOS DESENVOLVIDOS EM LINGUAGEM MATLAB PARA SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO OPERACIONAL DAS ALBUFEIRAS DA AGUIEIRA E DE FRONHAS

A.4.1. ALGORITMO REFERENTE AO MODELO DE OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO OPERACIONAL

```

% DADOS DE ENTRADA:
files=[];
filesB=[];
filesC=[];
xlRangeAG='C8:BA88';
xlRangeFR='BB8:CZ88';
fileformat=sprintf('SimHec-%d-%02d-%02d.xls',ano,mes,dd);
files = [files;fileformat];
fileformatB=sprintf('SimHec-%d-%02d-%02dB.xls',ano,mes,dd);
filesB = [filesB;fileformatB];
fileformatC=sprintf('SimHec-%d-%02d-%02dC.xls',ano,mes,dd);
filesC = [filesC;fileformatC];
% % % % CALCULO DAS PREVISÕES DE REFERÊNCIA
% % % Agueira
EPS=xlsread(files,'Sheet1',xlRangeAG);
EPSt=EPS(:,1:52)';
EPSord=sort(EPSt);
EPSf=EPSord';
MED=mean(EPS)';
PERC=EPSf(:,[13,26,38,46,52]);
FINAL=[PERC,MED, EPS(:,52)];
% % % Fronhas
EPS2=xlsread(files,'Sheet1',xlRangeFR);
EPSt2=EPS2(:,1:52)';
EPSord2=sort(EPSt2);
EPSf2=EPSord2';
MED2=mean(EPS2)';
PERC2=EPSf2(:,[13,26,38,46,52]);
FINAL2=[PERC2,MED2,EPS2(:,52)];
% % % Secção da foz do Ceira (J20)
EPS3=xlsread(filesB,'Sheet1',xlRangeAG);
% % % Sub-bacia Raiva (SB6)
EPS4=xlsread(filesB,'Sheet1',xlRangeFR);
% % % Sub-bacia Coimbra (SB7)
EPS5=xlsread(filesC,'Sheet1',xlRangeAG);
% % % Caudais em Coimbra (parte não regularizada)
EPS6=EPS3+EPS4+EPS5;
EPSt6=EPS6(:,1:52)';
EPSord6=sort(EPSt6);
EPSf6=EPSord6';
MED6=mean(EPS6)';
PERC6=EPSf6(:,[13,26,38,46,52]);
FINAL6=[PERC6,MED6,EPS6(:,52)];
files=[];
filesB=[];
filesC=[];
% Níveis de água máximos recomendáveis
OBJ_AG=125,5;
OBJ_FR=139;
% % % Volume afluente às duas albufeiras:
Vol_AG=FINAL*(3*36/10000);
Vol_FR=FINAL2*(3*36/10000);
% % % Caudais afluentes considerados para tomada de decisões:
QAfl_AG=[FINAL(1:25,5); FINAL(26:81,3)];
VAfl_AG=[Vol_AG(1:25,5); Vol_AG(26:81,3)];
QAfl_FR=[FINAL2(1:25,5); FINAL2(26:81,3)];
VAfl_FR=[Vol_FR(1:25,5); Vol_FR(26:81,3)];
QAfl_CO=[FINAL6(1:25,5); FINAL6(26:81,3)];
VAfl_CO=QAfl_CO*(3*36/10000);
% Volumes armazenados e níveis de água
Vai_AG=(-0.035859*Ni_AG^4+21.247081*Ni_AG^3-
4158.376221*Ni_AG^2+344459.083168*Ni_AG-10397089.896055)/1000;

```

```
Varm_AG=[Vai_AG];
N_AG=[Ni_AG];
Vai_FR=(0.0166185*Ni_FR^4-7.1669092*Ni_FR^3+1191.1626*Ni_FR^2-
89314.7919941*Ni_FR+2528199.7835)/1000;
Varm_FR=[Vai_FR];
N_FR=[Ni_FR];
% % % transvase
if N_AG(1)>N_FR(1)
    Qtrans_i=0;
elseif N_FR(1)>134
    Qtrans_i=30;
elseif N_FR(1)>120.5
    Qtrans_i=-0.05084*N_FR(1)^2+13.78508*N_FR(1)-904.65898;
elseif N_FR(1)>117
    Qtrans_i=-0.64758*N_FR(1)^2+155.7090*N_FR(1)-9342.4052;
else
    Qtrans_i=0;
end
Qtrans=[Qtrans_i];
Vtrans_i=Qtrans_i*(3*36/10000);
% % % MODELO DE OTIMIZAÇÃO
Comp=800;
incr=100;
Dif=1000;
while (Dif > 1) && (Comp <= 1000)
    Qtrans=[Qtrans_i];
    Vtrans=[Vtrans_i];
    Vdesc_AG=[Rlz_AG]*(3*36/10000);
    Vdesc_FR=[Rlz_FR]*(3*36/10000);
    Varm_AG=[Vai_AG];
    N_AG=[Ni_AG];
    Varm_FR=[Vai_FR];
    N_FR=[Ni_FR];
    for i=2:1:81
        % Pesos da função obj, que define as prioridades de descarga
        f=[1 10000 100000000 10 100000000];
        % Limites máximos e mínimos de cada uma das descargas
        lb=[0 0 0 0 0];
        ub=[500 1000 1000 250 250]*(3*36/10000);
        Aeq=[];
        beq=[];
        % % Restrições:
        % Limitar o caudal afluente a Coimbra em 800 - CASO 1
        A0=[1 1 1 1 1];
        b0=[Comp*(3*36/10000)-VAfl_CO(i)];
        % limitação das cotas nas albufeiras em função do volume armazenado
        % Aguieira
        A1=[-0.05789 -0.05789 -0.05789 0 0];
        b1=[OBJ_AG-100.3-0.05789*(Varm_AG(i-1)+(VAfl_AG(i)+Vtrans(i-1)))]];
        % % Fronhas
        A2=[0 0 0 -0.2369 -0.2369];
        b2=[OBJ_FR-119.15-0.2369*(Varm_FR(i-1)+(VAfl_FR(i)-Vtrans(i-1)))]];
        % Total
        A=[A0; A1; A2];
        b=[b0, b1, b2];
        % Função objetivo
        Desc=linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
        Vdesc_AGx=[Vdesc_AG;sum(Desc(1:3))];
        Vdesc_FRx=[Vdesc_FR;sum(Desc(4:5))];
        % extensão para repor os níveis de água nas cotas: NDO_AG=122 e NDO_FR=126
        if Vdesc_FR(i-1)<50*(3*36/10000);
            if N_FR(i-1)>136.5
                Vdesc_FRi=((-0.0283*N_FR(i-1)^2+10.691*N_FR(i-1)-663.62)+(-0.0465*N_FR(i-1)^2+15.788*N_FR(i-1)-1044.7))*(3*36/10000);
            elseif N_FR(i-1)>130.5
```

```

Vdesc_Fri=(-0.0465*N_FR(i-1)^2+15.788*N_FR(i-1)-1044.7)*(3*36/10000);
else
Vdesc_Fri=Vdesc_FRx(i);
end
elseif Vdesc_FR(i-1)<250*(3*36/10000);
if N_FR(i-1)>136.5
Vdesc_Fri=((-0.0283*N_FR(i-1)^2+10.691*N_FR(i-1)-663.62)+(-0.0465*N_FR(i-
1)^2+15.788*N_FR(i-1)-1044.7))*(3*36/10000);
elseif N_FR(i-1)>126
Vdesc_Fri=(-0.0465*N_FR(i-1)^2+15.788*N_FR(i-1)-1044.7)*(3*36/10000);
else
Vdesc_Fri=Vdesc_FRx(i);
end
end
elseif N_FR(i-1)>130.5
Vdesc_Fri=((-0.0283*N_FR(i-1)^2+10.691*N_FR(i-1)-663.62)+(-0.0465*N_FR(i-
1)^2+15.788*N_FR(i-1)-1044.7))*(3*36/10000);
elseif N_FR(i-1)>=126
Vdesc_Fri=(-0.0465*N_FR(i-1)^2+15.788*N_FR(i-1)-1044.7)*(3*36/10000);
else
Vdesc_Fri=Vdesc_FRx(i);
end
end
Vdesc_FR=[Vdesc_FR;Vdesc_Fri];
Comp800=Comp*(3*36/10000)-VAfl_CO(i)-Vdesc_FR(i);
if Comp800>=500*(3*36/10000);
if Comp800>Vdesc_AGx(i)
if N_AG(i-1)>NAG+0.1
Vdesc_AGi=500*(3*36/10000);
elseif N_AG(i-1)>=NAG-0.1
Vdesc_AGi=VAfl_AG(i)+Vtrans(i-1);
else
Vdesc_AGi=Vdesc_AGx(i);
end
else
Vdesc_AGi=Vdesc_AGx(i);
end
elseif Comp800>=VAfl_AG(i)+Vtrans(i-1);
if Comp800>Vdesc_AGx(i)
if N_AG(i-1)>NAG+0.1
Vdesc_AGi=Comp800;
elseif N_AG(i-1)>=NAG-0.1
Vdesc_AGi=VAfl_AG(i)+Vtrans(i-1);
else
Vdesc_AGi=Vdesc_AGx(i);
end
else
Vdesc_AGi=Vdesc_AGx(i);
end
else
Vdesc_AGi=Vdesc_AGx(i);
end
Vdesc_AG=[Vdesc_AG;Vdesc_AGi];
v1=Varm_AG(i-1)-Vdesc_AG(i)+VAfl_AG(i)+Vtrans(i-1);
Varm_AG=[Varm_AG; v1];
N_AG=[N_AG;0.05789*Varm_AG(i)+100.3];
v2=Varm_FR(i-1)-Vdesc_FR(i)+VAfl_FR(i)-Vtrans(i-1);
Varm_FR=[Varm_FR; v2];
N_FR=[N_FR;0.2369*Varm_FR(i)+119.15];
if N_AG(i)>N_FR(i)
trans=0;
elseif N_FR(i)>134
trans=30;
elseif N_FR(i)>120.5
trans=-0.05084*N_FR(i)^2+13.78508*N_FR(i)-904.65898;

```

```
elseif N_FR(i)>117
    trans=-0.64758*N_FR(i)^2+155.7090*N_FR(i)-9342.4052;
else
    trans=0
end
Qtrans=[Qtrans; trans];
Vtrans=Qtrans*(3*36/10000);
end
Qdesc_AG=Vdesc_AG*1/(3*36/10000);
Qdesc_FR=Vdesc_FR*1/(3*36/10000);
Qtrans=Qtrans;
QTOT_CO=Qdesc_AG+Qdesc_FR+QAfl_CO;
Q_max24_COIMBRA=max(QTOT_CO(1:8));
Q_max120_COIMBRA=max(QTOT_CO(1:40));
Q_Total_max_COIMBRA=max(QTOT_CO);
Dif=Q_Total_max_COIMBRA-Comp
if Dif<=1
    disp('OK')
else
    Qtrans=[Qtrans_i];
    Vtrans=[Vtrans_i]
    Vdesc_AG=[Rlz_AG]*(3*36/10000);
    Vdesc_FR=[Rlz_FR]*(3*36/10000);
    Varm_AG=[Vai_AG];
    N_AG=[Ni_AG];
    Varm_FR=[Vai_FR];
    N_FR=[Ni_FR];
    Qexp=Comp-QAfl_CO;
    Q=QAfl_AG+QAfl_FR-Qexp;
    Qinv=[Q(81)];
    Qinv_ac=[Q(81)];
    Qac=[];
    for i=80:-1:1
        q=Q(i);
        Qinv=[Qinv; q];
        qac=Qinv_ac(81-i)+Q(i);
        if qac>0
            qz=qac;
        else
            if q<0
                qz=qac;
            else
                qz=q;
            end
        end
        Qinv_ac=[Qinv_ac; qz];
    end
    Desc=[];
    for j=1:1:81
        if Qinv(j)>=0
            d=0;
        elseif Qinv_ac(j)>=0
            d=0;
        else
            if abs(Qinv(j))>abs(Qinv_ac(j))
                d=Qinv_ac(j);
            else
                d=Qinv(j);
            end
        end
        Desc=[Desc; d];
    end
    D=[];
    for j=81:-1:1
        qi=Qinv_ac(j);
```

```

        di=Desc(j);
        Qac=[Qac; qi];
        D=[D; di];
    end
    D=(D+Qexp)*(3*36/10000);
    for i=2:1:81
        f=[1 10000 100000000 10 100000000];
        lb=[0 0 0 0 0];
        ub=[500 1000 1000 250 250]*(3*36/10000);
        Aeq=[];
        beq=[];
        A0=[1 1 1 1 1];
        b0=[Comp*(3*36/10000)-VAfl_CO(i)];
        A1=[-0.05789 -0.05789 -0.05789 0 0];
        b1=[OBJ_AG-100.3-0.05789*(Varm_AG(i-1)+(VAfl_AG(i)+Vtrans(i-1)))];
        A2=[0 0 0 -0.2369 -0.2369];
        b2=[OBJ_FR-119.15-0.2369*(Varm_FR(i-1)+(VAfl_FR(i)-Vtrans(i-1)))];
        % condição de amortecimento de cheia
        A4=[-1 -1 -1 -1 -1];
        b4=[-D(i)];
        A=[A0; A1; A2; A4];
        b=[b0; b1; b2; b4];
        Desc=linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
        Vdesc_AG=[Vdesc_AG;sum(Desc(1:3))];
        Vdesc_FR=[Vdesc_FR;sum(Desc(4:5))];
        v1=Varm_AG(i-1)-Vdesc_AG(i)+VAfl_AG(i)+Vtrans(i-1);
        Varm_AG=[Varm_AG; v1];
        N_AG=[N_AG;0.05789*Varm_AG(i)+100.3];
        v2=Varm_FR(i-1)-Vdesc_FR(i)+VAfl_FR(i)-Vtrans(i-1);
        Varm_FR=[Varm_FR; v2];
        N_FR=[N_FR;0.2369*Varm_FR(i)+119.15];
        if N_AG(i)>N_FR(i)
            trans=0;
        elseif N_FR(i)>134
            trans=30;
        elseif N_FR(i)>120.5
            trans=-0.05084*N_FR(i)^2+13.78508*N_FR(i)-904.65898;
        elseif N_FR(i)>117
            trans=-0.64758*N_FR(i)^2+155.7090*N_FR(i)-9342.4052;
        else
            trans=0
        end
        Qtrans=[Qtrans; trans];
        Vtrans=Qtrans*(3*36/10000);
    end
    Qdesc_AG=Vdesc_AG*1/(3*36/10000);
    Qdesc_FR=Vdesc_FR*1/(3*36/10000);
    Qtrans=Vtrans*1/(3*36/10000);
    QTOT_CO=Qdesc_AG+Qdesc_FR+QAfl_CO;
    Q_max24_COIMBRA=max(QTOT_CO(1:8));
    Q_max120_COIMBRA=max(QTOT_CO(1:40));
    Q_Total_max_COIMBRA=max(QTOT_CO);
    Dif=Q_Total_max_COIMBRA-Comp
    Comp=Comp+incr;
end
end
Nivel_max_AG=max(N_AG)
Nivel_max_FR=max(N_FR)
Xdesc_AG=Qdesc_AG(1:9);
Xdesc_FR=Qdesc_FR(1:9);

```

A.4.2. ALGORITMO PARA APLICAÇÃO DO MODELO NA GESTÃO OPERACIONAL DE SITUAÇÕES REAIS

```
disp('DATA DA ANALISE PRETENDIDA');
ano=input('Ano? ');
mes=input('Mês? (de 01 a 12)=');
dia=input('Dia inicio? ');
dia2=input('Dia fim? ');
dd=dia;
O_AG=xlsread('Dados_Base','AG');
OBS_AG=O_AG(1:12754,1:5);
O_FR=xlsread('Dados_Base','FR');
OBS_FR=O_FR(1:12754,1:5);
[l1,c1]=find(OBS_AG(:,1)==ano);
[l2,c2]=find(OBS_AG(l1,2)==mes);
l2=l1(l2);
[l3,c3]=find(OBS_AG(l2,3)==dia);
l4=l2(l3);
loc=l4;
OBS2_AG=[OBS_AG(loc,1:5)];
OBS2_FR=[OBS_FR(loc,1:5)];
N1_AG=122;
R1z_AG=0;
N1_FR= 125;
R1z_FR= 0;
Ni_AG=N1_AG;
Ni_FR=N1_FR;
run('Analise_regras_MODELO_FINAL.m')
Val_AG=(-0.035859*N1_AG^4+21.247081*N1_AG^3-
4158.376221*N1_AG^2+344459.083168*N1_AG-10397089.896055)/1000;
Val_FR=(0.0166185*N1_FR^4-7.1669092*N1_FR^3+1191.1626*N1_FR^2-
89314.7919941*N1_FR+2528199.7835)/1000;
Q_CO=FINAL6(1:8,3);
% % % Transvase
if N1_AG>N1_FR
    Qtransl=0;
elseif N1_FR>134
    Qtransl=30;
elseif N1_FR>120.5
    Qtransl=(-0.05084*N1_FR^2+13.78508*N1_FR-904.65898);
elseif N1_FR>117
    Qtransl=(-0.6475*N1_FR^2+155.71*N1_FR-9342.4);
else
    Qtransl=0;
end
Qalf_AG1=(OBS2_AG(1,5)+Qtransl);
Qalf_FR1=(OBS2_FR(1,5)-Qtransl);
Valf_AG1=Qalf_AG1*(3*36/10000);
Valf_FR1=Qalf_FR1*(3*36/10000);
% % Descargas
if Q_max24_COIMBRA>1200
    if N1_AG>125
        if Qalf_AG1>500;
            Q1_AG=Qalf_AG1;
        else
            Q1_AG=500;
        end
    elseif N1_AG<111;
        Q1_AG=0;
    else
        Q1_AG=500;
    end
end
if N1_FR>139
    if Qalf_FR1<500;
```

```

        if Qalf_FR1>250;
        Q1_FR=Qalf_FR1;
        else
        Q1_FR=(-0.0465*N1_FR^2+15.788*N1_FR-1044.7);
        end
    else
        Q1_FR=((-0.0283*N1_FR^2+10.691*N1_FR-663.62)+(-0.0465*N1_FR^2+15.788*N1_FR-
1044.7));
        end
elseif N1_FR<117;
    Q1_FR=0;
else
    if N1_FR<=130.5
        Q1_FR=0;
    elseif N1_FR<=136.5
        Q1_FR=(-0.0465*N1_FR^2+15.788*N1_FR-1044.7);
    else
        if Qalf_FR1>500;
        Q1_FR=((-0.0283*N1_FR^2+10.691*N1_FR-663.62)+(-0.0465*N1_FR^2+15.788*N1_FR-
1044.7));
        elseif Qalf_FR1>250;
        Q1_FR=Qalf_FR1;
        else
        Q1_FR=(-0.0465*N1_FR^2+15.788*N1_FR-1044.7);
        end
    end
end
else
    if N1_AG>125.5
        if Qdesc_AG(1)<Qalf_AG1;
        Q1_AG=Qalf_AG1;
        else
        Q1_AG=Qdesc_AG(1);
        end
    elseif N1_AG<111;
        Q1_AG=0;
    else
        Q1_AG=Qdesc_AG(1);
    end
    if N1_FR>139
        if Qdesc_FR(1)<Qalf_FR1;
        Q1_FR=Qalf_FR1;
        else
        Q1_FR=Qdesc_FR(1);
        end
    elseif N1_FR<117;
        Q1_FR=0;
    else
        Q1_FR=Qdesc_FR(1);
    end
end
end
    Qal_FR=(VAfl_FR(1)-Vtrans(1))/(3*36/10000);
    Qal_AG=(VAfl_AG(1)+Vtrans(1))/(3*36/10000);
Ni_AG=[N1_AG];
Qd_AG=[Q1_AG];
Qalf_AGi=[Qalf_AG1];
Valf_AGi=[Valf_AG1];
Vai_AG=[Val_AG];
Ni_FR=[N1_FR];
Qd_FR=[Q1_FR];
Qalf_FRi=[Qalf_FR1];
Valf_FRi=[Valf_FR1];
Vai_FR=[Val_FR];
Qa_FR=[Qal_FR];
Qa_AG=[Qal_AG];

```

```
Qtransi=[Qtrans1];
Q_Coimbral=Q1_AG+Q1_FR+Q_CO(1);
Q_Coimbra=[Q_Coimbral];
for i=2:1:8
% Calcular volumes armazenados
Vai_AGx=Vai_AG(i-1)+(Valf_AGi(i-1)-Qd_AG(i-1)*(3*36/10000));
Vai_FRx=Vai_FR(i-1)+(Valf_FRi(i-1)-Qd_FR(i-1)*(3*36/10000));
Vai_AG=[Vai_AG; Vai_AGx];
Vai_FR=[Vai_FR; Vai_FRx];
Ni_AGx=0.05789*Vai_AG(i)+100.3;
Ni_AG=[Ni_AG; Ni_AGx];
Ni_FRx=0.2369*Vai_FR(i)+119.15;
Ni_FR=[Ni_FR; Ni_FRx];
% transvase
if Ni_AG(i)>Ni_FR(i)
    Qtransix=0;
elseif Ni_FR(i)>134
    Qtransix=30;
elseif Ni_FR(i)>120.5
    Qtransix=(-0.05084*Ni_FR(i)^2+13.78508*Ni_FR(i)-904.65898);
elseif Ni_FR(i)>117
    Qtransix=(-0.6475*Ni_FR(i)^2+155.71*Ni_FR(i)-9342.4);
else
    Qtransix=0;
end
Qtransi=[Qtransi;Qtransix];
% Volumes afluentes
Qalf_AGix=(OBS2_AG(i,5)+Qtransi(i));
Qalf_FRix=(OBS2_FR(i,5)-Qtransi(i));
Qalf_AGi=[Qalf_AGi; Qalf_AGix];
Qalf_FRi=[Qalf_FRi; Qalf_FRix];
Valf_AGix=Qalf_AGi(i)*(3*36/10000);
Valf_FRix=Qalf_FRi(i)*(3*36/10000);
Valf_AGi=[Valf_AGi; Valf_AGix];
Valf_FRi=[Valf_FRi; Valf_FRix];
% Volume descarregado
if Q_max24_COIMBRA>1200;
if Ni_AG(i)>125.5
    if Qalf_AGix>500;
        Qi_AG=Qalf_AGix;
    else
        Qi_AG=500;
    end
elseif Ni_AG(i)<111;
    Qi_AG=0;
else
    Qi_AG=500;
end
if Ni_FR(i)>139
    if Qalf_FRix<500;
        if Qalf_FRix>250;
            Qi_FR=Qalf_FRix;
        else
            Qi_FR=(-0.0465*Ni_FR(i)^2+15.788*Ni_FR(i)-1044.7);
        end
    else
        Qi_FR=(( -0.0283*Ni_FR(i)^2+10.691*Ni_FR(i)-663.62)+(-
0.0465*Ni_FR(i)^2+15.788*Ni_FR(i)-1044.7));
    end
elseif Ni_FR(i)<117;
    Qi_FR=0;
else
    if Ni_FR(i)<=130.5
        Qi_FR=0;
    elseif Ni_FR(i)<=136.5
```

```

    Qi_FR=(-0.0465*Ni_FR(i)^2+15.788*Ni_FR(i)-1044.7);
else
    if Qalf_FRix>500;
        Qi_FR=(-0.0283*Ni_FR(i)^2+10.691*Ni_FR(i)-663.62)+(-
0.0465*Ni_FR(i)^2+15.788*Ni_FR(i)-1044.7));
    elseif Qalf_FRix>250;
        Qi_FR=Qalf_FRix;
    else
        Qi_FR=(-0.0465*Ni_FR(i)^2+15.788*Ni_FR(i)-1044.7);
    end
end
end
else
if Ni_AG(i)>125.5
    if Qdesc_AG(i)<Qalf_AGix;
        Qi_AG=Qalf_AGix;
    else
        Qi_AG=Qdesc_AG(i);
    end
elseif Ni_AG(i)<111;
    Qi_AG=0;
else
    Qi_AG=Qdesc_AG(i);
end
if Ni_FR(i)>139
    if Qdesc_FR(i)<Qalf_FRix;
        Qi_FR=Qalf_FRix;
    else
        Qi_FR=Qdesc_FR(i);
    end
elseif Ni_FR(i)<117;
    Qi_FR=0;
else
    Qi_FR=Qdesc_FR(i);
end
end
Qd_FR=[Qd_FR; Qi_FR];
Qd_AG=[Qd_AG; Qi_AG];
Qai_FR=(Vaf1_FR(i)-Vtrans(i))/(3*36/10000);
Qai_AG=(Vaf1_AG(i)+Vtrans(i))/(3*36/10000);
Qa_FR=[Qa_FR; Qai_FR];
Qa_AG=[Qa_AG; Qai_AG];
Q_Coimbrai=Qd_AG(i)+Qd_FR(i)+Q_CO(i);
Q_Coimbra=[Q_Coimbra; Q_Coimbrai];
end
R_max=[Q_Total_max_COIMBRA];
R_CO1=FINAL6(9,3);
R1z_AG=Qdesc_AG(9);
R1z_FR=Qdesc_FR(9);
RESULTADOS2=[Qalf_AGi, Qd_AG, Ni_AG, Qalf_FRi, Qd_FR, Ni_FR, Q_Coimbra, Vai_AG,
Vai_FR, Valf_AGi, Valf_FRi, Qa_AG, Qa_FR];
RESULTADOS=RESULTADOS2;
clear N* V* Q* l* f* E* C* P*
% % aplicação aos restantes dias
for dd=dia+1:1:dia2
    DIA=dd
    [l1,c1]=find(OBS_AG(:,1)==ano);
    [l2,c2]=find(OBS_AG(l1,2)==mes);
    l2=l1(l2);
    [l3,c3]=find(OBS_AG(l2,3)==dd);
    l4=l2(l3);
    loc=l4;
    OBS2_AG=[OBS_AG(loc,1:5)];
    OBS2_FR=[OBS_FR(loc,1:5)];
    Val_AG=RESULTADOS2(8,8)+ RESULTADOS2(8,10)-RESULTADOS2(8,2)*(3*36/10000);

```

```
Val_FR=RESULTADOS2(8,9)+ RESULTADOS2(8,11)-RESULTADOS2(8,5)*(3*36/10000);
N1_AG=0.05789*Val_AG+100.3;
N1_FR=0.2369*Val_FR+119.15;
Ni_AG=N1_AG;
Ni_FR=N1_FR;
run('Analise_regras_MODELO_FINAL.m')
Q_CO=[R_CO1; FINAL6(2:8,3)];
% Transvase
if N1_AG>N1_FR
    Qtransl=0;
elseif N1_FR>134
    Qtransl=30;
elseif N1_FR>120.5
    Qtransl=(-0.05084*N1_FR^2+13.78508*N1_FR-904.65898);
elseif N1_FR>117
    Qtransl=(-0.6475*N1_FR^2+155.71*N1_FR-9342.4);
else
    Qtransl=0;
end
Qalf_AG1=(OBS2_AG(1,5)+Qtransl);
Qalf_FR1=(OBS2_FR(1,5)-Qtransl);
Valf_AG1=Qalf_AG1*(3*36/10000);
Valf_FR1=Qalf_FR1*(3*36/10000);
% % % % Descargas
if Q_max24_COIMBRA>1200;
if N1_AG>125.5
    if Qalf_AG1>500;
        Q1_AG=Qalf_AG1;
    else
        Q1_AG=500;
    end
elseif N1_AG<111;
    Q1_AG=0;
else
    Q1_AG=500;
end
if N1_FR>139
    if Qalf_FR1<500;
        if Qalf_FR1>250;
            Q1_FR=Qalf_FR1;
        else
            Q1_FR=(-0.0465*N1_FR^2+15.788*N1_FR-1044.7);
        end
    else
        Q1_FR=((-0.0283*N1_FR^2+10.691*N1_FR-663.62)+(-0.0465*N1_FR^2+15.788*N1_FR-
1044.7));
    end
elseif N1_FR<117;
    Q1_FR=0;
else
    if N1_FR<=130.5
        Q1_FR=0;
    elseif N1_FR<=136.5
        Q1_FR=(-0.0465*N1_FR^2+15.788*N1_FR-1044.7);
    else
        if Qalf_FR1>500;
            Q1_FR=((-0.0283*N1_FR^2+10.691*N1_FR-663.62)+(-0.0465*N1_FR^2+15.788*N1_FR-
1044.7));
        elseif Qalf_FR1>250;
            Q1_FR=Qalf_FR1;
        else
            Q1_FR=(-0.0465*N1_FR^2+15.788*N1_FR-1044.7);
        end
    end
end
end
```



```

else
if N1_AG>125.5
    if Qdesc_AG(1)<Qalf_AG1;
        Q1_AG=Qalf_AG1;
    else
        Q1_AG=R1z_AG;
    end
elseif N1_AG<111;
    Q1_AG=0;
else
    Q1_AG=R1z_AG;
end
if N1_FR>139
    if Qdesc_FR(1)<Qalf_FR1;
        Q1_FR=Qalf_FR1;
    else
        Q1_FR=R1z_FR;
    end
elseif N1_FR<117;
    Q1_FR=0;
else
    Q1_FR=R1z_FR;
end
end
Qa1_FR=(Vaf1_FR(1)-Vtrans(1))/(3*36/10000);
Qa1_AG=(Vaf1_AG(1)+Vtrans(1))/(3*36/10000);
Ni_AG=[N1_AG];
Qd_AG=[Q1_AG];
Qalf_AGi=[Qalf_AG1];
Valf_AGi=[Valf_AG1];
Vai_AG=[Val_AG];
Ni_FR=[N1_FR];
Qd_FR=[Q1_FR];
Qalf_FRi=[Qalf_FR1];
Valf_FRi=[Valf_FR1];
Vai_FR=[Val_FR];
Qa_FR=[Qa1_FR];
Qa_AG=[Qa1_AG];
Qtransi=[Qtrans1];
Q_Coimbral=Q1_AG+Q1_FR+Q_CO(1);
Q_Coimbra=[Q_Coimbral];
for i=2:1:8
    Vai_AGx=Vai_AG(i-1)+(Valf_AGi(i-1)-Qd_AG(i-1)*(3*36/10000));
    Vai_FRx=Vai_FR(i-1)+(Valf_FRi(i-1)-Qd_FR(i-1)*(3*36/10000));
    Vai_AG=[Vai_AG; Vai_AGx];
    Vai_FR=[Vai_FR; Vai_FRx];
    Ni_AGx=0.05789*Vai_AG(i)+100.3;
    Ni_AG=[Ni_AG; Ni_AGx];
    Ni_FRx=0.2369*Vai_FR(i)+119.15;
    Ni_FR=[Ni_FR; Ni_FRx];
    % transvase
    if Ni_AG(i)>Ni_FR(i)
        Qtransix=0;
    elseif Ni_FR(i)>134
        Qtransix=30;
    elseif Ni_FR(i)>120.5
        Qtransix=(-0.05084*Ni_FR(i)^2+13.78508*Ni_FR(i)-904.65898);
    elseif Ni_FR(i)>177
        Qtransix=(-0.6475*Ni_FR(i)^2+155.71*Ni_FR(i)-9342.4);
    else
        Qtransix=0;
    end
    Qtransi=[Qtransi;Qtransix];
    % Volumes afluentes
    Qalf_AGix=(OBS2_AG(i,5)+Qtransi(i));

```

```
Qalf_FRix=(OBS2_FR(i,5)-Qtransi(i));
Qalf_AGi=[Qalf_AGi; Qalf_AGix];
Qalf_FRI=[Qalf_FRI; Qalf_FRix];
Valf_AGix=Qalf_AGi(i)*(3*36/10000);
Valf_FRix=Qalf_FRI(i)*(3*36/10000);
Valf_AGi=[Valf_AGi; Valf_AGix];
Valf_FRI=[Valf_FRI; Valf_FRix];
% Volume descarregado
if Q_max24_COIMBRA>1200;
if Ni_AG(i)>125.5
    if Qalf_AGix>500;
        Qi_AG=Qalf_AGix;
    else
        Qi_AG=500;
    end
elseif Ni_AG(i)<111;
    Qi_AG=0;
else
    Qi_AG=500;
end
if Ni_FR(i)>139
    if Qalf_FRix<500;
        if Qalf_FRix>250;
            Qi_FR=Qalf_FRix;
        else
            Qi_FR=(-0.0465*Ni_FR(i)^2+15.788*Ni_FR(i)-1044.7);
        end
    else
        Qi_FR=(-0.0283*Ni_FR(i)^2+10.691*Ni_FR(i)-663.62)+(-
0.0465*Ni_FR(i)^2+15.788*Ni_FR(i)-1044.7));
    end
elseif Ni_FR(i)<117;
    Qi_FR=0;
else
    if Ni_FR(i)<=130.5
        Qi_FR=0;
    elseif Ni_FR(i)<=136.5
        Qi_FR=(-0.0465*Ni_FR(i)^2+15.788*Ni_FR(i)-1044.7);
    else
        if Qalf_FRix>500;
            Qi_FR=(-0.0283*Ni_FR(i)^2+10.691*Ni_FR(i)-663.62)+(-
0.0465*Ni_FR(i)^2+15.788*Ni_FR(i)-1044.7));
        elseif Qalf_FRix>250;
            Qi_FR=Qalf_FRix;
        else
            Qi_FR=(-0.0465*Ni_FR(i)^2+15.788*Ni_FR(i)-1044.7);
        end
    end
end
else
if Ni_AG(i)>125.5
    if Qdesc_AG(i)<Qalf_AGix;
        Qi_AG=Qalf_AGix;
    else
        Qi_AG=Qdesc_AG(i);
    end
elseif Ni_AG(i)<111;
    Qi_AG=0;
else
    Qi_AG=Qdesc_AG(i);
end
if Ni_FR(i)>139
    if Qdesc_FR(i)<Qalf_FRix;
        Qi_FR=Qalf_FRix;
    else
```

```

        Qi_FR=Qdesc_FR(i);
    end
elseif Ni_FR(i)<117;
    Qi_FR=0;
else
    Qi_FR=Qdesc_FR(i);
end
end
Qai_FR=(VAfl_FR(i)-Vtrans(i))/(3*36/10000);
Qai_AG=(VAfl_AG(i)+Vtrans(i))/(3*36/10000);
Qa_FR=[Qa_FR; Qai_FR];
Qa_AG=[Qa_AG; Qai_AG];
Qd_FR=[Qd_FR; Qi_FR];
Qd_AG=[Qd_AG; Qi_AG];
Q_Coimbrai=Qd_AG(i)+Qd_FR(i)+Q_CO(i);
Q_Coimbra=[Q_Coimbra; Q_Coimbrai];
end
R_max=[R_max; Q_Total_max_COIMBRA];
R_COL=FINAL6(9,3);
R1z_FR=Qdesc_FR(9);
R1z_AG=Qdesc_AG(9);
RESULTADOS2=[Qalf_AGi, Qd_AG, Ni_AG, Qalf_FRi, Qd_FR, Ni_FR, Q_Coimbra, Vai_AG,
Vai_FR, Valf_AGi, Valf_FRi, Qa_AG, Qa_FR];
RESULTADOS=[RESULTADOS; RESULTADOS2];
clear N* V* Q* l* f* E* C*
end

```


ANEXO 5

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA GESTÃO DO SISTEMA DE ALBUFEIRAS PARA DAS CHEIAS DE JANEIRO DE 2013, DE MARÇO DE 2013 E DE JANEIRO DE 2014

A.5.1. APLICAÇÃO AO PERÍODO DA CHEIA DE JANEIRO DE 2013 (DE 15 A 29/01/2013)

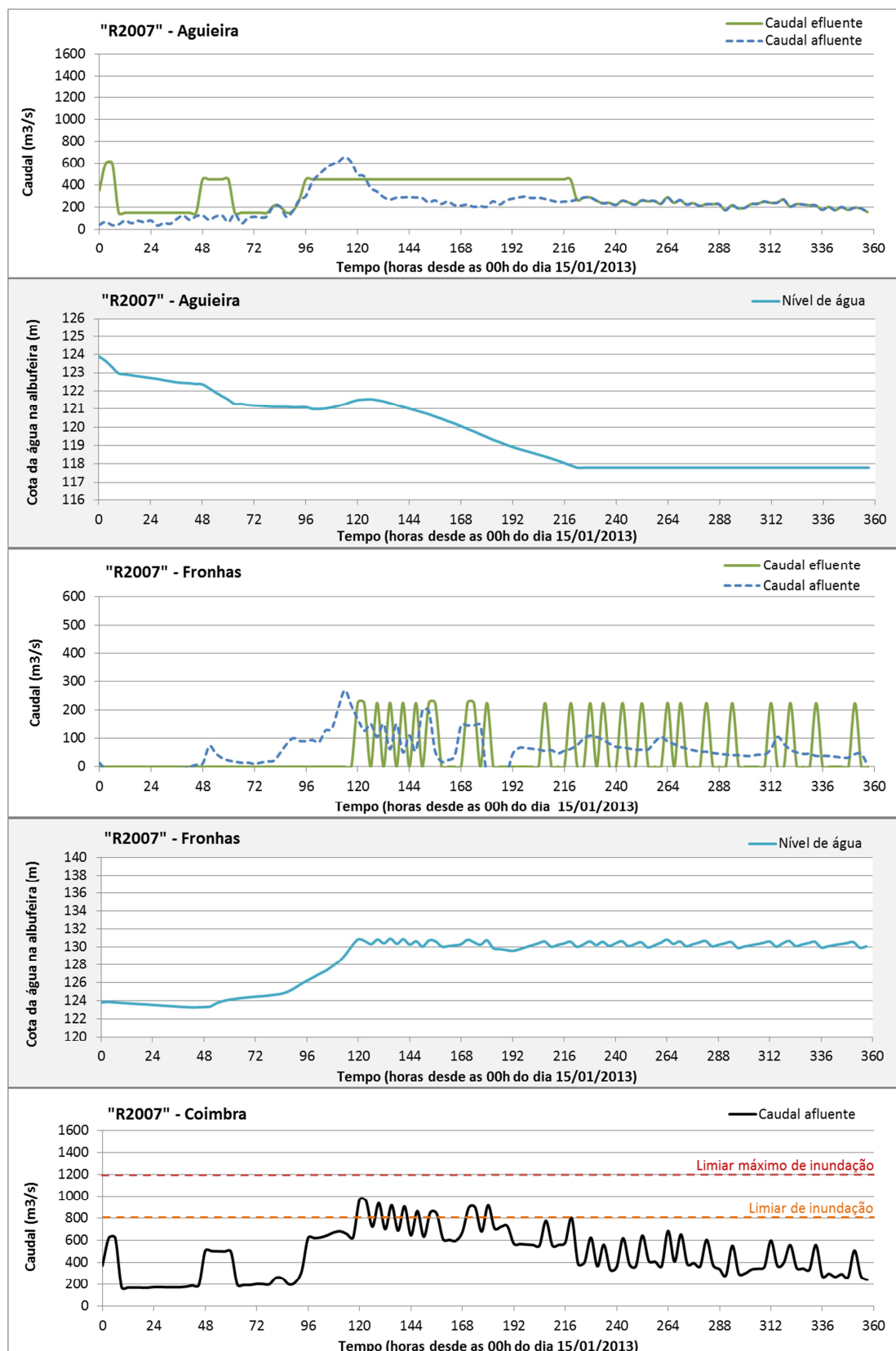


Figura A.5.1.1- Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Agueira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando as regras de exploração "R2007". Período de simulação: 15 a 29/01/2013.

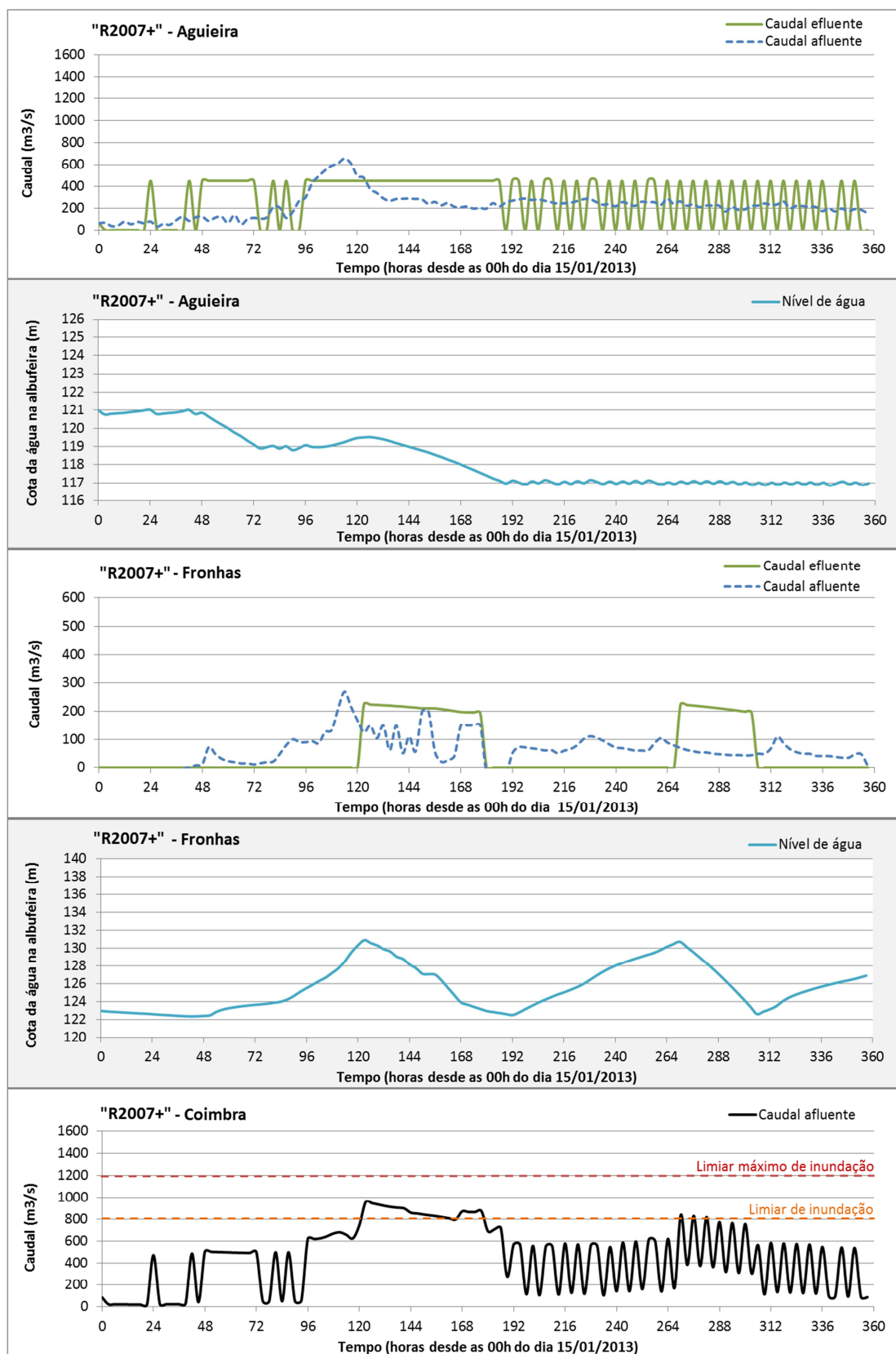


Figura A.5.1.2- Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando as regras de exploração "R2007+". Período de simulação: 15 a 29/01/2013.

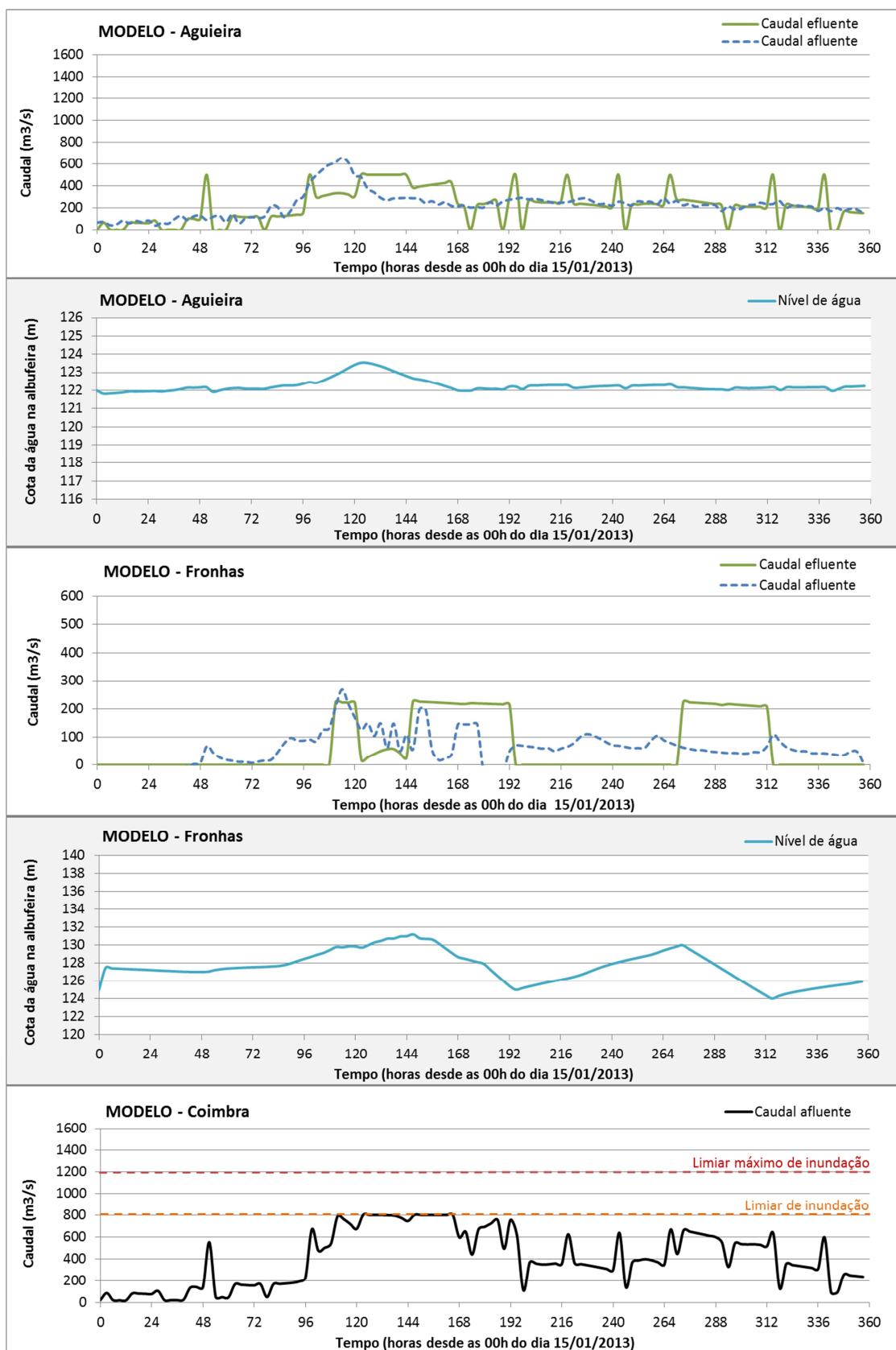


Figura A.5.1.3 - Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Agueira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando o modelo de gestão de albufeiras desenvolvido. Período de simulação: 15 a 29/01/2013.

A.5.2. APLICAÇÃO AO PERÍODO DA CHEIA DE MARÇO / ABRIL DE 2013 (DE 23/03 A 06/04/2013)

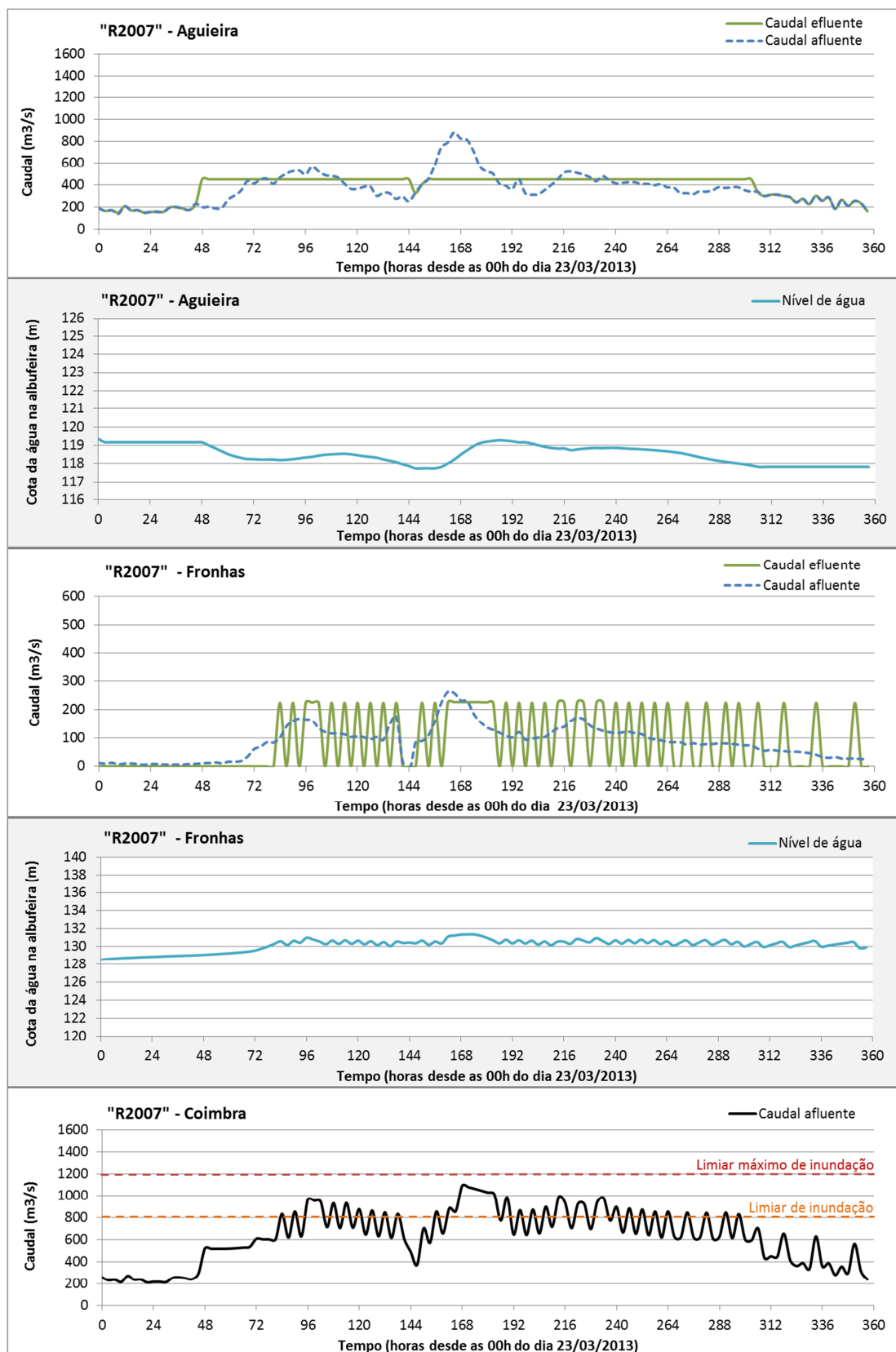


Figura A.5.2.1- Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando as regras de exploração "R2007". Período de simulação: 23/03 a 06/04/2013.

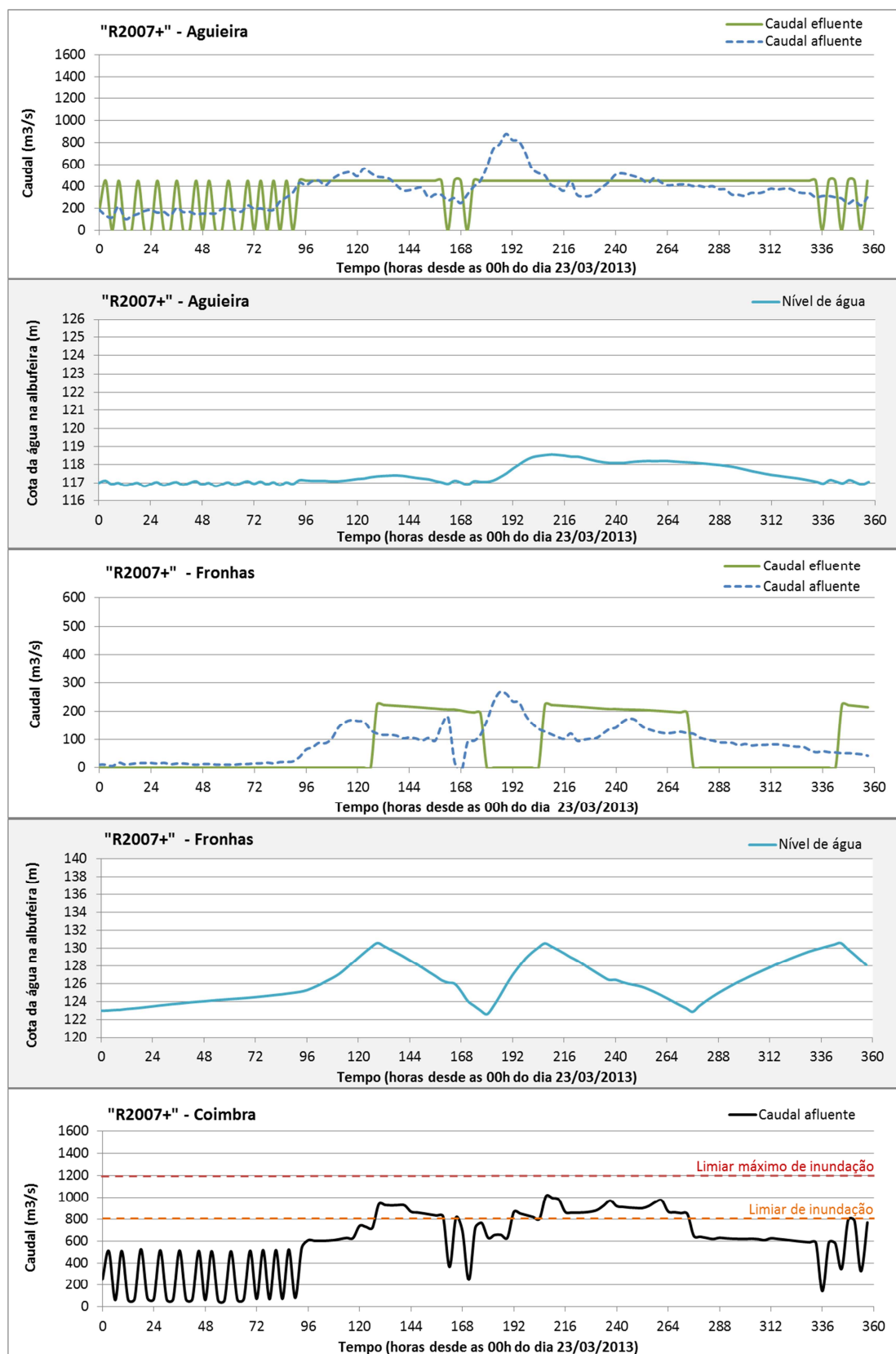


Figura A.5.2.2- Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando as regras de exploração "R2007+". Período de simulação: 23/03 a 06/04/2013.

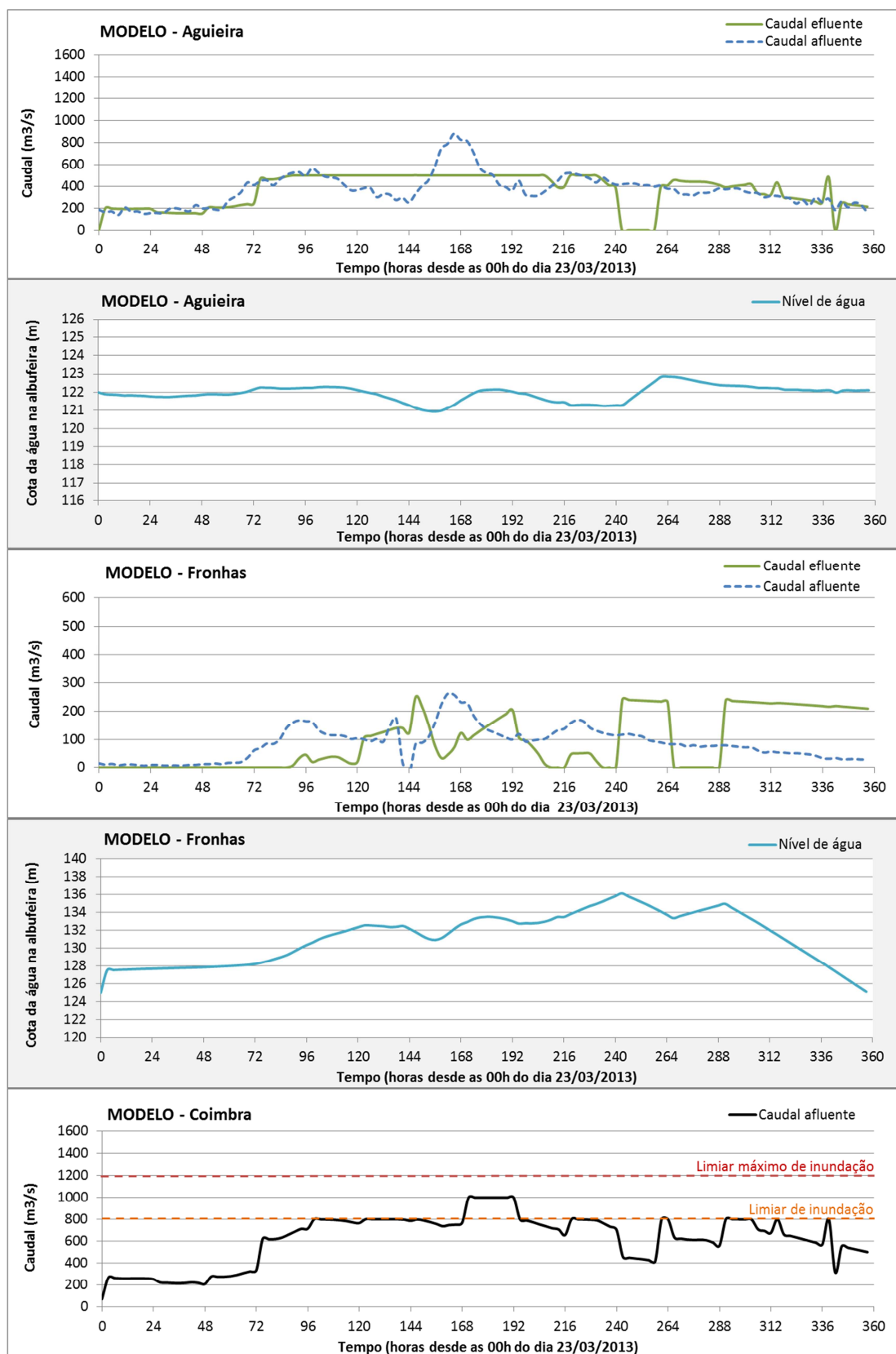


Figura A.5.2.3- Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando o modelo de gestão de albufeiras desenvolvido. Período de simulação: 23/03 a 06/04/2013.

A.5.3. APLICAÇÃO AO PERÍODO DA CHEIA DE JANEIRO DE 2014 (DE 01 A 15/01/2014)

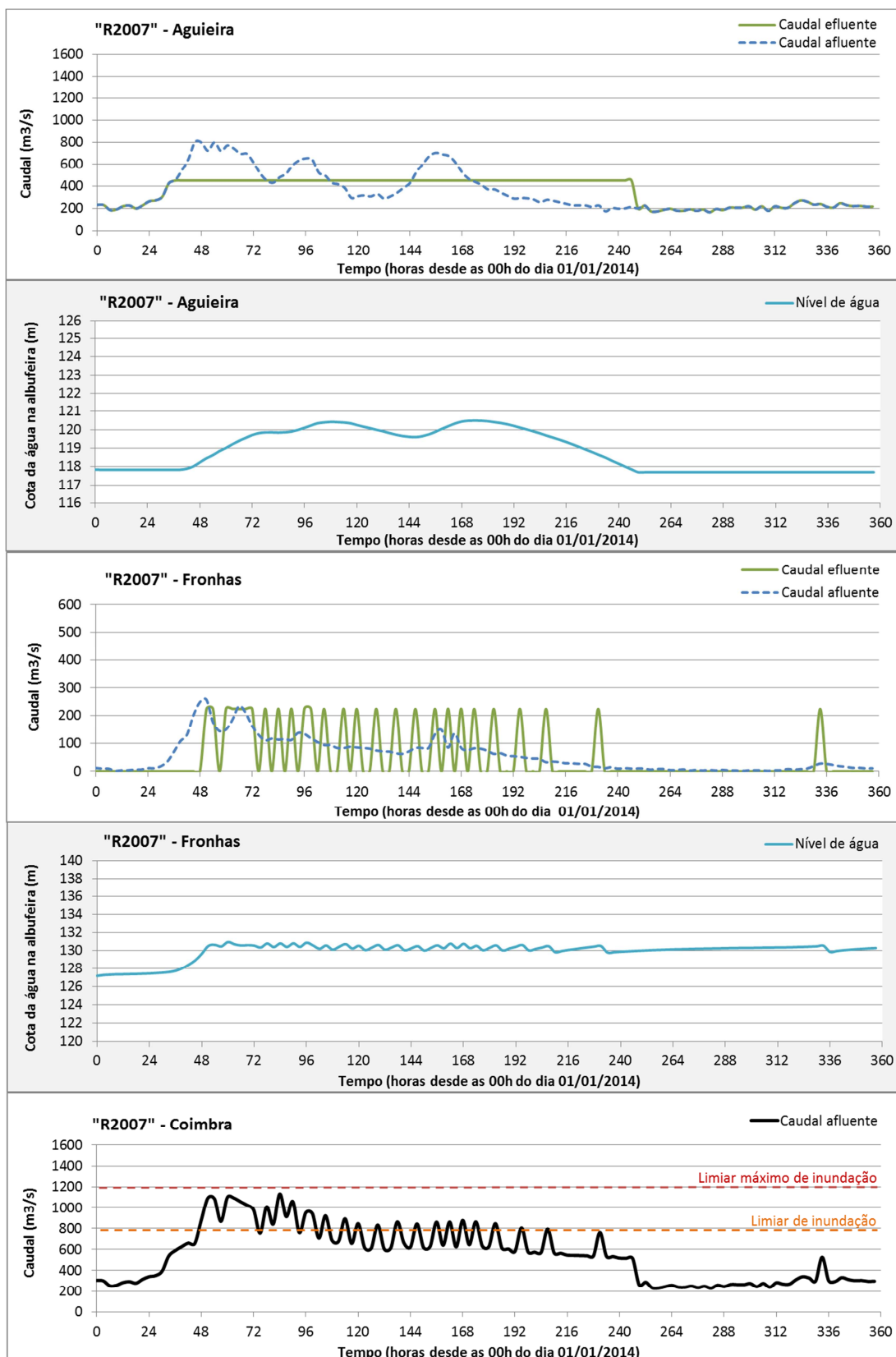


Figura A.5.1.1- Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Agueira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando as regras de exploração "R2007". Período de simulação: 01 a 15/01/2014.

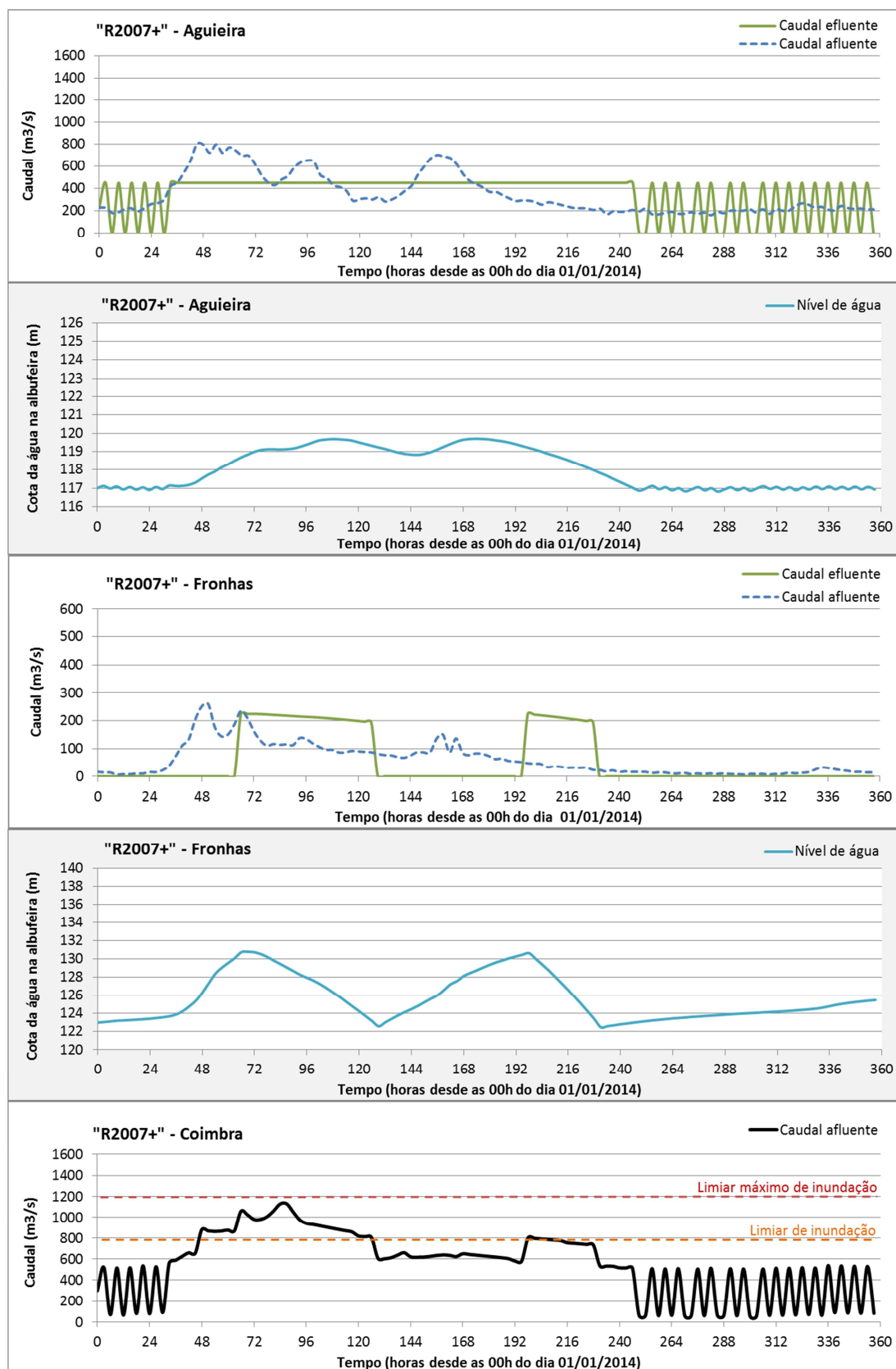


Figura A.5.1.2- Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Aguieira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando as regras de exploração "R2007+". Período de simulação: 01 a 15/01/2014.

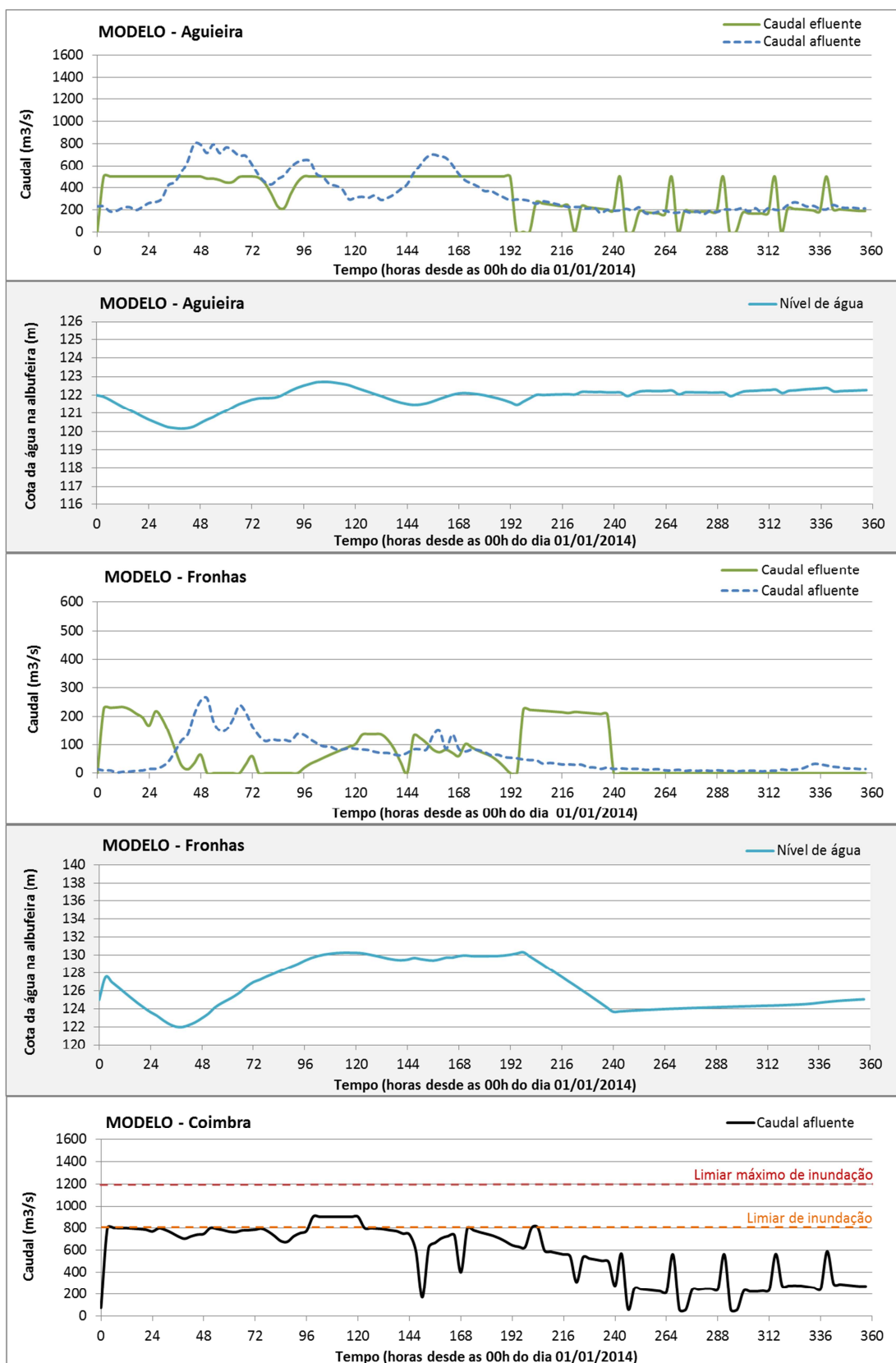


Figura A.5.1.3- Resultados dos caudais efluentes e níveis de água nas albufeiras da Agueira e de Fronhas e do caudal afluente a Coimbra, obtidos utilizando o modelo de gestão de albufeiras desenvolvido. Período de simulação: 01 a 15/01/2014.

